

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 73 с., 30 рис., 24 таблиць, 17 джерел.

У даній роботі створено пристрій управління двигуном (кроковим) на основі модулю MEMS (Micro-Electro-Mechanical System – мікроелектромеханічна система). У ході роботи було розроблено проектний розрахунок параметрів і розробка конструкції друкованого вузла блоку пристрою, та створено програмне забезпечення.

Основні конструктивні і техніко-експлуатаційні показники: розміри друкованого вузла  $99 \times 69.8 \times 10.5$  мм, середнє напрацювання на відмову 10706,7 годин.

Ключові слова: MEMS-МОДУЛЬ, МІКРОКОНТРОЛЛЕР, КРОКОВИЙ ДВИГУН, ПЛАТА ДРУКОВАНА, ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК, НАДІЙНІСТЬ, РОЗРОБКА.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	6
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД</b> .....	8
1.1 Об’єкт досліджень. ....	8
1.2 MEMS технології. ....	9
1.3 Технології розпізнавання жестів.....	11
1.4 Двигуни у робототехніці.....	13
<b>РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА</b> .....	15
2.1 Розробка апаратного забезпечення. ....	15
2.1.1 Опис схеми електричної структурної.....	15
2.1.2 Опис схеми електричної принципової. ....	17
2.1.3 Визначення вимог по стійкості до механічних і кліматичних впливів.....	19
2.1.4 Вибір елементної бази і попередня компоновка конструкції електронного пристрою.....	19
2.1.5 Розробка конструкції друкованої плати.....	40
2.1.6 Розробка конструкції друкованого вузла.....	43
2.1.7 Вибір умов охолодження і розрахунок теплового режиму.....	46
2.1.8 Розрахунок надійності пристрою .....	55
2.1.9 Вихідні дані створення апаратного забезпечення.....	57
2.2 Розробка програмного забезпечення. ....	58
2.2.1 Підготовка до роботи. ....	58
2.2.2 Створення змінної для контролю за перериваннями.....	60
2.2.3 Початкові налаштування .....	61
2.2.4 Основна програма.....	63
2.2.5 Створення функції мотору .....	67
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	71
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b> .....	72

## ВСТУП

Актуальність досліджень. На сьогоднішній час кроковий двигун є одним з основних різновидів приводів для різноманітних органів управління технічних систем, починаючи від побутових пристроїв механічних переміщень і до складних технологічних агрегатів: технічних маніпуляторів, верстатів з числовим програмним управлінням тощо. Від якості управління цими двигунами значно залежить і якість виконання функцій переміщення усього складного технічного комплексу [14, 15].

Що стосується режимів управління кроковим двигуном, в останні роки був досягнутий значний успіх. Режими роботи крокових двигунів отримали широкий розвиток: кроковий, напівкроковий, мікрокроковий. Значних успіхів було також досягнуто в розробці елементної бази для побудови систем управління кроковим двигуном. На сьогоднішній день існує досить широкий спектр спеціалізованих драйверів крокових двигунів, а також мікроконтролерів, які дозволяють реалізувати будь-який необхідний режим управління кроковим двигуном. Однак способи формування команд для управління кроковими двигунами недостатньо широкі і засновані головним чином на використанні програми послідовності, прив'язаною до певних тимчасових інтервалах (наприклад, управління рухом робочого інструмента для верстатів з числовим програмним управлінням).

Слід зазначити, що в останні роки людино-машинні інтерфейси, технології віртуальної або доповненої реальності розвиваються досить інтенсивно, а тому трансформація кінематичних рухів людини в відповідні рухи виконавчих механізмів технічної системи вельми актуальна. Розробка широкого спектру таких інтерфейсів створить ефективну основу для інтеграції людини безпосередньо в управління різними технічними комплексами і системами. Самим важливим аспектом та перевагою є те що людина може знаходитися на відстані від двигуна.

Основними функціональними особливостями системи управління є:

- управління двигуном на відстані;

- управління двигуном завдяки кінетичній силі.

Потрібно також додати, що така система має дуже багатий потенціал для розвитку. У даний час система є прив'язана відстанню дроту як крокового двигуна, так і MEMS-модулю до мікроконтролера. Така проблема може бути усунена завдяки бездротовому зв'язку, наприклад завдяки Bluetooth- або WiFi-модулю. Але зараз ці можливі поліпшення було б важко та затратно реалізувати, тому зосередимося на тому що є.

Об'єкт досліджень: Комп'ютерна система управління кроковим двигуном на основі MEMS-маніпулятора.

Предмет досліджень: Способи побудови систем керування об'єктами, завдяки двигунам керованими кінетичною силою на відстані.

Завдання дослідження: Розробка комп'ютерної системи управління кроковим двигуном на основі MEMS-маніпулятора який перетворює кінетичну силу в механічну.

Методи дослідження: Системний аналіз, розрахунок показників температури та надійності, програмування об'єктно-орієнтоване.

Практичне значення отриманих результатів: Результати, які ми отримали в ході роботи, можна використовувати в різних областях застосування, таких як:

- сфера розваг;
- медицина;
- наукова сфера;
- установи освіти (школи, технікуми, вузи);
- промислові підприємства;
- VR-технології;
- зони під охороною.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Об'єкт досліджень.

Основною задачею дослідження є розробка універсального людино-машинного інтерфейсу перетворення кінематичних переміщень людини до відповідної послідовності команд кроковому двигуну на кутове обертання. Апаратна реалізація людино-машинного інтерфейсу полягає у розробці пристрою маніпулятора для формування команд кроковому двигуну у відповідності з кінематичними рухами людини.

Комп'ютерна система управління кроковим двигуном являє собою комплекс програмного та апаратного забезпечення та використовується для організації систем контролю доступу для об'єктів різного розміру та складності. Система дозволяє реалізувати контроль доступу для малих (однієї чи більше точок управління) та великих розподілених об'єктів (включаючи промислові об'єкти) без обмеження кількості контрольних точок.

В основі пристрою маніпулятора покладено використання мікроелектромеханічної системи (MEMS – Micro-Electro-Mechanical System), яка здійснює перетворення рухів людини у відповідні електричні сигнали. Принцип роботи MEMS-маніпулятора проілюстрований на рисунку 1.



Рисунок 1.1 – Структурна схема системи управління кроковим двигуном на основі MEMS-маніпулятора

Такий прилад має дуже широку область застосувань завдяки своїй практичності. Його можна використовувати як для особистого користування, наприклад, у виробництві іграшок і роботів, так і у комерційних цілях, як прилад контролю у різноманітних механізмах.

Недоліки пристрою:

- обмежений час роботи від батареї;
- при неправильному керуванні з'являється механічний резонанс;
- складнощі при роботі з дуже високими швидкостями;
- споживання електроенергії не зменшується навіть без навантаження.

## 1.2 MEMS технології.

Термін MEMS відноситься до технології, яка дозволила мініатюризувати механічні структури і інтегрувати їх в електронні схеми. В результаті цього утворилися пристрої, які було б правильніше назвати «системами», оскільки в них механічні компоненти та електричні елементи працюють спільно і вирішують спільні завдання.

Таким чином, MEMS - це мікроелектрична і мікромеханічна система. Механічні компоненти й системи зазвичай вважаються менш технологічними в порівнянні з електричними рішеннями, але це не означає, що механічна база завжди низькотехнологічна. Механічні реле, наприклад, набагато старше транзисторних збірок, які виконують ідентичний функціонал, однак реле до сих пір широко застосовуються.

Тим не менше, більшість механічних пристроїв дуже габаритні порівняно з електронними. І навіть в тих випадках, коли механічний компонент є більш простим і ефективним рішенням, найчастіше він буде замінений на електронний унаслідок економії простору друкованої плати і мінімізації габаритних розмірів.

MEMS технологія представляє концептуально нове рішення цієї дилеми: якщо модифікувати механічні компоненти таким чином, що вони стануть не тільки мініатюрними, але й процес їх виготовлення буде повністю ідентичним виробничому процесу виготовлення мікросхем, та вийде компонент, який об'єднує в собі переваги шпалери технологій.

Мініатюрна MEMS структура проводиться методом фізичної модифікації кремнію (або іншого матеріалу підкладки). Потім такі структури об'єднуються з мікросхемою і вся електромеханічна система корпусірується, представляючи собою єдиної пристрій.

MEMS пристрої можуть складатися з мікромашин структур, мікродатчиків, мікроелектронних схем і мікроактуаторов. Всі вони інтегровані на одному кристалі. Датчики пристроїв дозволяють визначити термічні, механічні, магнітні, електромагнітні або хімічні зміни, які можуть бути перетворені електричною схемою в певний сигнал, а актуатори забезпечують фізичні зміни, а не просто вимірюють їх.

MEMS технологія може бути інтегрована в найрізноманітніші електронні компоненти. Застосування цієї технології виправдано, якщо на перше місце поставлені простота реалізації або продуктивність.

Сьогодні MEMS компоненти зустрічаються в чотирьох товарних групах:

- аудіо компоненти
- датчики
- ключі
- генератори сигналів

Для створюваної системи обрано MEMS з категорії датчики. Саме у цій категорії знаходиться компонент, що має функцію відстеження місцезнаходження у просторі, модуль з акселерометром та гіроскопом, відтворений у мініатюрі. Робота кожного полягає в наступному: 1) Акселерометр MEMS вимірює прискорення, вимірюючи зміну ємності. Він має масу, прикріплену до пружини, яка обмежена для руху в одному напрямку та нерухомих зовнішніх плит. Отже, коли буде застосовано прискорення в конкретному напрямку, маса переміститься, а ємність між пластинами та масою зміниться. Ця зміна ємності буде виміряна, оброблена і відповідатиме певному значенню прискорення. 2) Гіроскоп MEMS вимірює кутову швидкість за допомогою ефекту Кориоліса, це продемонстровано на рисунку 1.2.

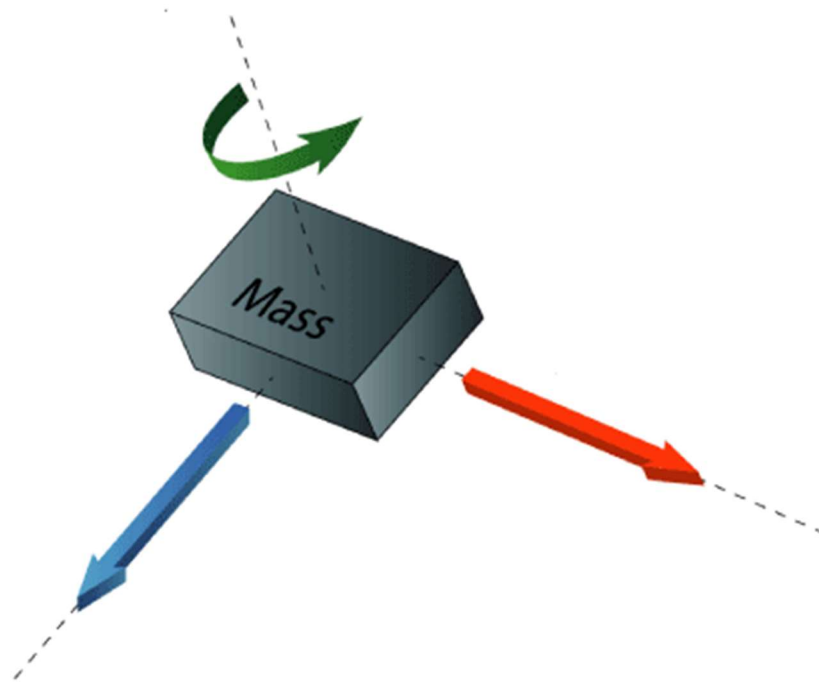


Рисунок 1.2 – Принцип MEMS Гіроскоп

Коли маса рухається в певному напрямку з певною швидкістю і коли застосовуватиметься зовнішня швидкість кута, як показують із зеленою стрілкою, виникатиме сила, як показують синьою червоною стрілкою, що спричинить перпендикулярне переміщення маси. Так подібний акселерометру, це переміщення призведе до зміни ємності, яка буде виміряна, оброблена і відповідатиме певній кутовій швидкості. Тобто маса, яка постійно рухається або коливається, і коли буде застосована зовнішня кутова швидкість, гнучка частина маси буде рухатися і здійснювати перпендикулярний зміщення. [13] На рисунку 1.2 можна побачити: синю стрілку, силу Коріоліса; красну – швидкість; зелена – кутова швидкість.

### 1.3 Технології розпізнавання жестів.

В наш час виробники мають у своєму розпорядженні цілком зрілу технологію оптичного розпізнавання жестів, придатну для використання в масових продуктах.

У свою чергу, багато користувачів проявляють інтерес до маніпуляторів на базі цієї технології і готові голосувати за них своїм гаманцем, що переконливо



підтверджує як індустрія розваг, так і наукові центри, в яких присутність людини зводиться до величезного ризику.

Зараз наочним показником є VR-технології (Virtual Reality з англ. Віртуальна реальність), в яких перенесення дій створює ефект присутності в зовсім іншому місці. Однак, якщо говорити про роль подібних контролерів стосовно ПК, то хоча вони і здатні замінити цілий набір ігрових маніпуляторів, та до реальної конкуренції з мишею і клавіатурою їм ще дуже далеко.

В ідеалі розпізнавання жестів дозволить людині спілкуватися та співпрацювати з машинами природним чином, без будь-яких механічних посередників. Використання датчиків, які виявляють рух тіла, технологія розпізнавання жестів дозволяє керувати пристроями, такими як телевізори, комп'ютери та відеоігри, насамперед за допомогою руху руки чи пальця. За допомогою цієї технології можна здійснювати комутацію телевізійних каналів, регулювати гучність тощо.

Розпізнавання жестів дозволяє комп'ютерам бути більш доступними для людей з обмеженими фізичними можливостями та робить більш природним співробітництво в іграх або віртуальному світі 3d. Використовуючи розпізнавання жестів, можна вказати пальцем на екрані комп'ютера, і курсор відповідно переміститься. Потенційно це може робити непотрібним такі пристрої, як миші, клавіатури та навіть сенсорні екрани. Розпізнавання жестів, а також розпізнавання особи, розпізнавання голосу, відстеження очей і розпізнавання руху губ є компонентами, які програмні і апаратні розробники називають як "перцептивний призначений для користувача інтерфейс".

Завданням перцептивного призначеного для користувача інтерфейсу є підвищення ефективності та простоти використання пристроїв, відомої як юзабіліті. У персональних комп'ютерах жести найчастіше використовуються для введення команд. Жести рук і тіла можуть бути посилені за допомогою контролера з акселерометром і гіроскопами, які "розуміють" нахили, обертання і прискорення руху. Приклад наведений на рисунку 1.2, людина маючи у руці пристрій зчитування місцезнаходження у просторі відправляє команди до

комп'ютерної системи жестами руки. Також обчислювальний пристрій може бути оснащено камерою, що дозволяє програмі у пристрої розпізнавати і інтерпретувати конкретні жести. Помах руки, наприклад, може припинити програму.

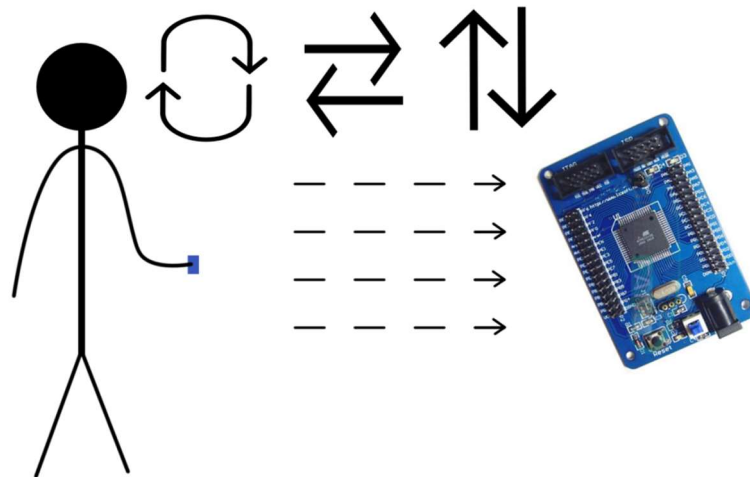


Рисунок 1.3 – Взаємодія людини та комп'ютерної системи

Таким чином, слід зазначити, що технологія розпізнання жестів вже зараз є досить цікавою та досить практичною. Хоч ця технологія ще є досить далекою від ідеальних маніпуляторів, котрих зараз дуже багато, але вона дуже перспективна у плані розвитку та практичності. Зараз маніпуляторів велика кількість і всі вони створені під конкретні цілі.

Ось деякі типи комп'ютерних маніпуляторів:

З відносним зазначенням позиції (переміщення)

- Миша
- Трекпоінт
- Тачпад
- Джойстик
- Roller Mouse
- Leap Motion

З можливістю вказівки абсолютної позиції

- Графічний планшет
- Світлове перо
- Аналоговий джойстик
- Клавіатура
- Джойстики
- Геймпади
- Комп'ютерний кермо

Найпрактичнішими можна вважати клавіатуру та миш, тому що вони, по-перше, легкі у використанні, а по-друге, є багатоцільовими і мають можливість замінити будь-які маніпулятори з наведених вище.

#### **1.4 Двигуни у робототехніці.**

Вибір правильного двигуна має вирішальне значення для ефективності та продуктивності ваших програм управління рухом. Вибирати між серводвигунами та кроковими двигунами може бути важко, оскільки існує багато критеріїв: вартість, крутний момент, ефективність, швидкість, схема, тощо.

Порівняльний аналіз критеріїв серводвигунів та крокових двигунів дає змогу визначити плюси та мінуси кожного з них. Потім вже можна узгодити можливості мотора з потребами вашої програми.

#### **Відмінності сервоприводів і крокових двигунів для керування рухом**

Основна відмінність цих двигунів полягає в загальній кількості полюсів. Крокові двигуни мають високу кількість полюсів, як правило, від 50 до 100. Сервомотори мають низьку кількість полюсів - між 4 і 12.

Ця різниця в кількості полюсів означає, що крокові двигуни поступово рухаються з послідовним імпульсом у системі замкнутого циклу. Сервомоторам потрібен кодер для регулювання імпульсів для регулювання положення.

Крокові двигуни, завдяки великій кількості полюсів, пропонують точне керування приводом для програм управління рухом. Вони мають високий крутний момент на низьких швидкостях, а також вони порівняно недорогі та широко доступні.

Хоча у крокових двигунів є обмеження: на високих швидкостях вони втрачають майже весь крутний момент, іноді до 80%, вони виробляють високий рівень вібрації і схильні до резонансних проблем. Крокові двигуни також виробляють велику кількість тепла, що може бути проблемою в певних сферах застосування.

### **Сервомотори в управлінні рухом: плюси і мінуси.**

Основна перевага сервомоторів полягає в тому, що вони забезпечують високий рівень крутного моменту на високій швидкості - те, що крокові мотори не можуть зробити. Вони також працюють з 80 - 90% ККД. Серводвигуни можуть працювати в електроприводі змінного або постійного струму і не страждати від вібрації або резонансу.

Сервомотори мають багато переваг, але головним недоліком є те, що вони дорожчі, ніж крокові мотори. Додайте в вартість кодера, а часто і коробки передач, і вся система може стати досить дорогою. Також потреба у кодері та коробці передач робить систему більш механічно складною, що призводить до більш частого обслуговування та більших витрат.

З точки зору режимів управління кроковими двигунами, останніми роками досягнуто значного успіху. Одержали достатньо широкого розвитку режими роботи крокових двигунів: кроковий, напівкроковий, мікрокроковий [12, 14]. Також досягнуто значного успіху в напрямку розробки елементної бази побудови систем управління кроковими двигунами. На сьогодні присутня достатньо широка номенклатура спеціалізованих драйверів крокових двигунів, а також мікроконтролерів, які дозволяють реалізувати будь-який необхідний режим управління кроковим двигуном [16, 17]. При цьому, методи формування команд на управління кроковими двигунами не мають достатньо широкого різноманіття та базуються, в основному, на використанні програми послідовності виконання кроків, прив'язаної до визначених інтервалів часу (наприклад, управління переміщенням робочого інструменту для верстатів з числовим програмним управлінням).

## РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА

### 2.1 Розробка апаратного забезпечення.

**2.1.1 Опис схеми електричної структурної.** Основою усієї системи є – мікроконтролер, він обробляє отримані дані та. Для роботи системи підключається джерело живлення через регулятор напруги. Мікроконтролер обробляє введену інформацію що прийшла з MEMS-модулю, обробляє цей сигнал, та відправляє свій на драйвер котрий керує двигуном. Двигун виконує команди в залежності від отриманих даних. Електрична структурна схема показана на рисунку 2.1.

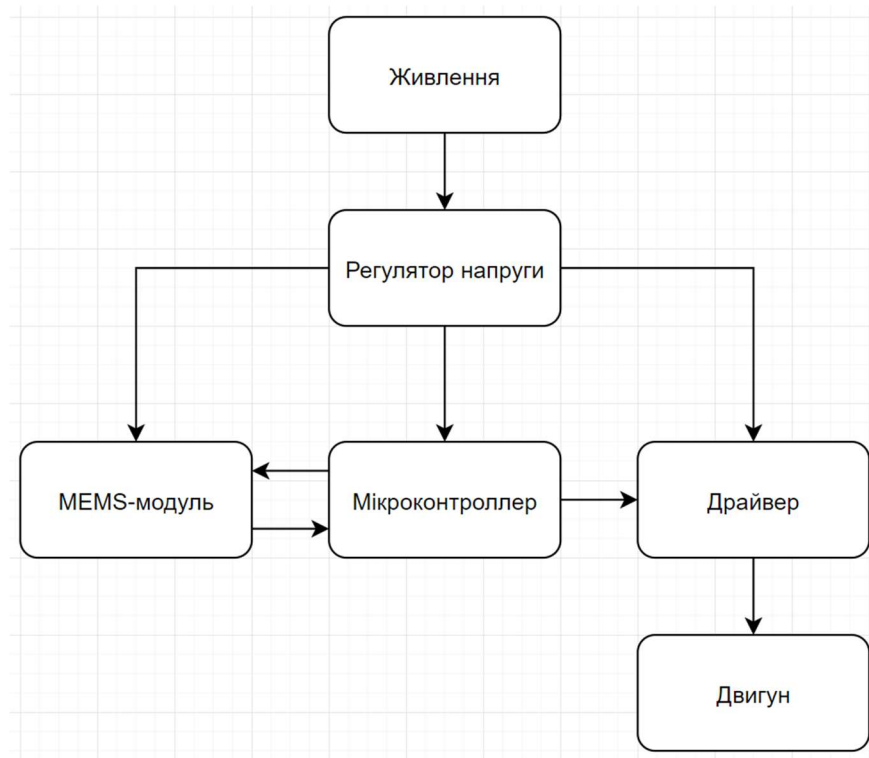


Рисунок 2.1 – Структурна схема

У пристрої використовуються такі мікросхеми та елементи:

- двигун – електрична машина, що перетворює електричну енергію на механічну, а саме кроковий двигун у котрому ротор не обертається неперервно, а виконує щоразу обертальний рух на заданий кут;

- діод випрямний (D1-D2) – це напівпровідниковий діод, призначений для перетворення змінного струму в постійний. Випрямні діоди виконуються на основі р-n-переходу і мають дві області, одна з них є більш низкоомною (містить велику концентрацію домішки), і називається емітером. Інша область, база – більше високоомна (містить меншу концентрація домішки). [7]
- драйвер – дозволяє працювати з різними типами двигунів та обробляти їх сигнали;
- кварцовий резонатор (Q1) - електронний прилад, в якому п'єзоелектричний ефект і явище механічного резонансу використовуються для побудови високочастотного резонансного елемента електронної схеми.
- конденсатори (C1-C14) – пасивний елемент двухполюсник з постійним або змінним значенням ємності і малою провідністю; пристрій для накопичення заряду і енергії електричного поля [7].
- мікроконтролер (IC2, IC3) – мікросхема, що використовується для керування іншими електронними пристроями;
- регулятор напруги – пристрій, що дозволяє змінювати величину електричної напруги на виході при впливі на органи управління, або при надходженні сигналу;
- резистори (R1-R4) – пасивний елемент електричних ланцюгів, що має певне або змінне значення електричного опору, призначений для лінійного перетворення струму у напругу і напругу за рахунок струму, обмеження струму, поглинання електричної енергії [11];
- стабілітрон (D3-D4) – або діод Зенера, полу-провідниковий діод, працюючий при зворотному зміщенні у режимі пробую. До пробую протікають малі струми витоку через стабілітрон, і його опір дуже високий. Коли відбувається пробій, струм через діод Зенера різко зростає, і його диференціальний опір падає до величини, яка для різних пристроїв змінюється від Ом до сотень Ом.

- MEMS-модуль – у даному приладі виступає компактним і легким модулем 3х осьового акселерометра і 3х осьового гіроскопу керований по протоколу I2C (TWI). Даний датчик відмінно підходить для визначення положення в просторі.
- USB-порт (X1) – порт для підключення до PC USB дротом.
- З'єднувач типу JST – дріт для підключення одного приладу до іншого.

### 2.1.2 Опис схеми електричної принципової.

Живлення елементів. Для роботи системі потрібно подавати напругу 5V на батарейний блок G1, рекомендується використовувати батарею з напругою від 5V до 12V та струмом 2A. Живлення підключається до мікроконтролера (ATmega16) на пін VCC та AVCC через регулятор напруги, котрий зменшує напругу до рекомендованих 5V. Також отримані 5V відправляються на живлення MEMS-модуля, на його пін VCC. Для роботи драйверу двигуна також задіяно 5V, вони подані на VS та VSS, а також на піни EN1 та EN2, котрі відповідають за кількість робочих виходів. Усі піни GND заземляються.

Мікроконтролер. Для роботи ATmega16 було задіяно ще декілька пінів потрібних для роботи. Пін RESET, котрий відповідає за скидання МК, підключено до землі через кнопку, бо RESET має зворотний хід включення і якщо на RESET приде 0, то МК перезапуститься.

Драйвер. Так як L293D повинен приймати сигнали, то відповідно має бути підключений до МК, тому PD5 – PD2 Atmega16 приєднано до пінів IN1 – IN4 L293D відповідно. Піни OUT1 – OUT4 були під'єднані до клемних блоків X7 та X8, щоб пізніше можна було до цих самих клемників підключити кроковий двигун.

MEMS-модуль. GY-521 є зовнішнім приладом, підключення його відбувається через штирьовий з'єднувач I2C котрий знаходиться на платі. Через пін 1 з'єднувача підключено живлення. Через пін 2 з'єднувача кинута земля. Через пін 3 з'єднувача поєднано піни SCL МК (PC0) та модулю SCL. Через пін 4 з'єднувача поєднано піни SDA МК (PC1) та модулю SDA.

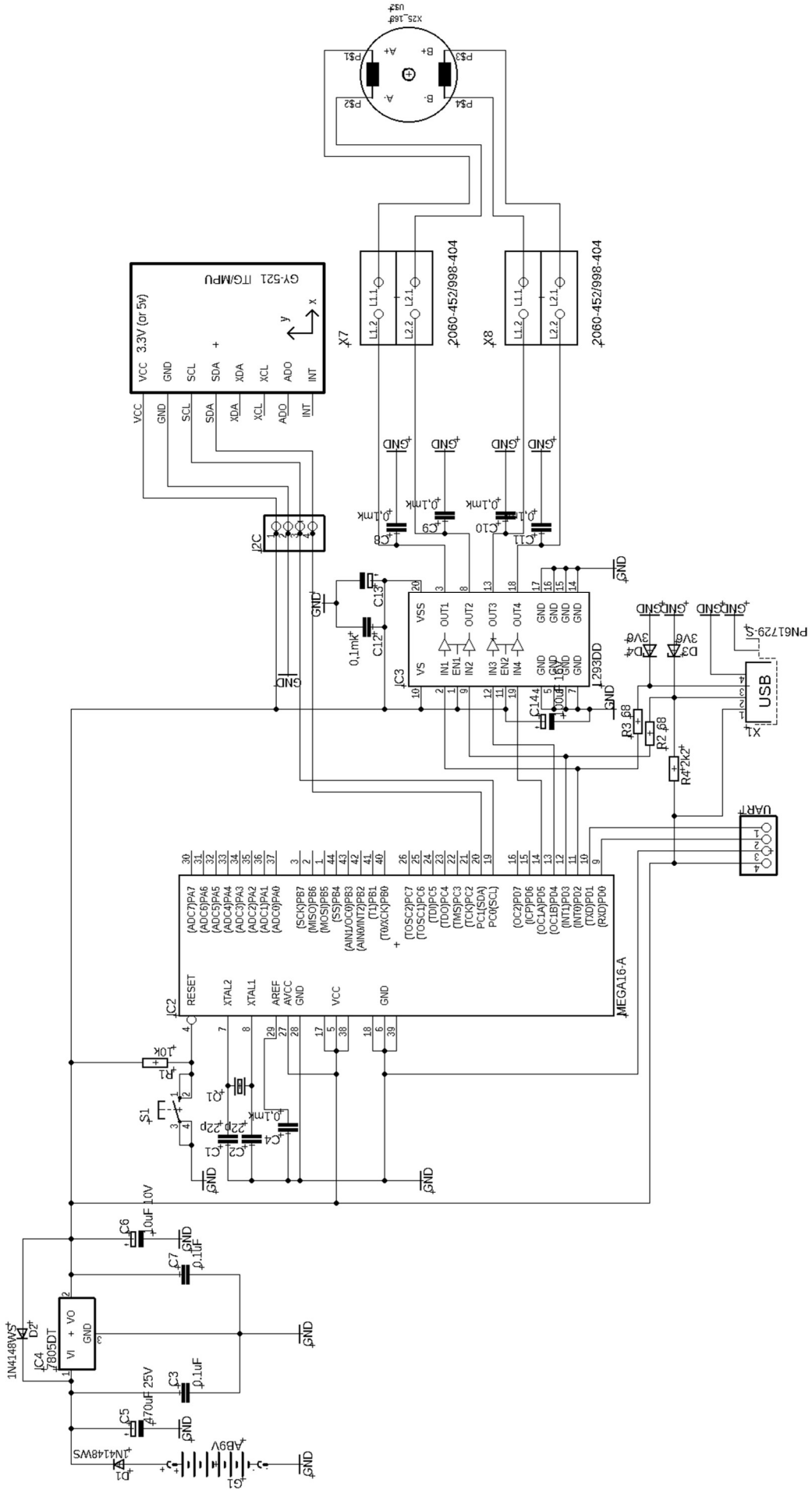


Рисунок 2.2 – Електрична принципова схема пристрою



### **2.1.3 Визначення вимог по стійкості до механічних і кліматичних впливів.**

Розташування електронного обладнання визначає ступінь впливу механічних та кліматичних факторів. Тому на етапі проектування необхідно визначити природу та рівень цих ефектів. Ці дії включають механічні вібрації та удари, температурні впливи, високу і низьку вологість і тиск.

Відповідно до ГОСТ 15150-69 [2] визначають вимоги до механічних та кліматичних впливів.

Очікується, що пристрій буде розташований у європейських країнах. Для європейських країн / регіонів кліматичні показники цього пристрою належать до категорії - У. У категорії "У" передбачається, що пристрій призначений для роботи при температурі  $20^{\circ}\text{C}$  в умовах помірного клімату з температурним діапазоном від  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  і зміною вологості до 80%.

Оскільки цей пристрій розміщено в приміщенні (об'єм), температура і вологість значно нижчі, ніж на відкритому повітрі, тому цей пристрій було обрано як категорію розміщення-3 [10], а саме - робота в приміщенні з природною вентиляцією без штучно регульованих кліматичних умов, коли коливання температури та вологості повітря, а також вплив піску та пилу значно менші, ніж зовні.

Для цього типу розміщення робоча температура становить  $-45 \dots +40^{\circ}\text{C}$ , максимальна робоча температура  $-50 \dots +45^{\circ}\text{C}$ , а відносна вологість повітря - 75% при  $15^{\circ}\text{C}$ .

### **2.1.4 Вибір елементної бази і попередня компоновка конструкції електронного пристрою.**

За браком даних звертатись до даташитів елементів.

#### **Мікроконтролер ATmega16-16AU**

Мікросхема ATMEGA16-16PU є 8-розрядний AVR-мікроконтролер з гарвардською архітектурою (програма і дані знаходяться в різних адресних просторах). Має систему команд, близьку до ідеології RISC (обчислення зі

скороченим набором команд). Процесор AVR має 32 8-бітових регістра загального призначення, об'єднаних в регістровий файл. На відміну від «ідеального» RISC, регістри не абсолютно ортогональні. На рисунку 2.3 зображені розміри мікроконтролера. Основні параметри мікросхеми перераховані в таблиці 2.1

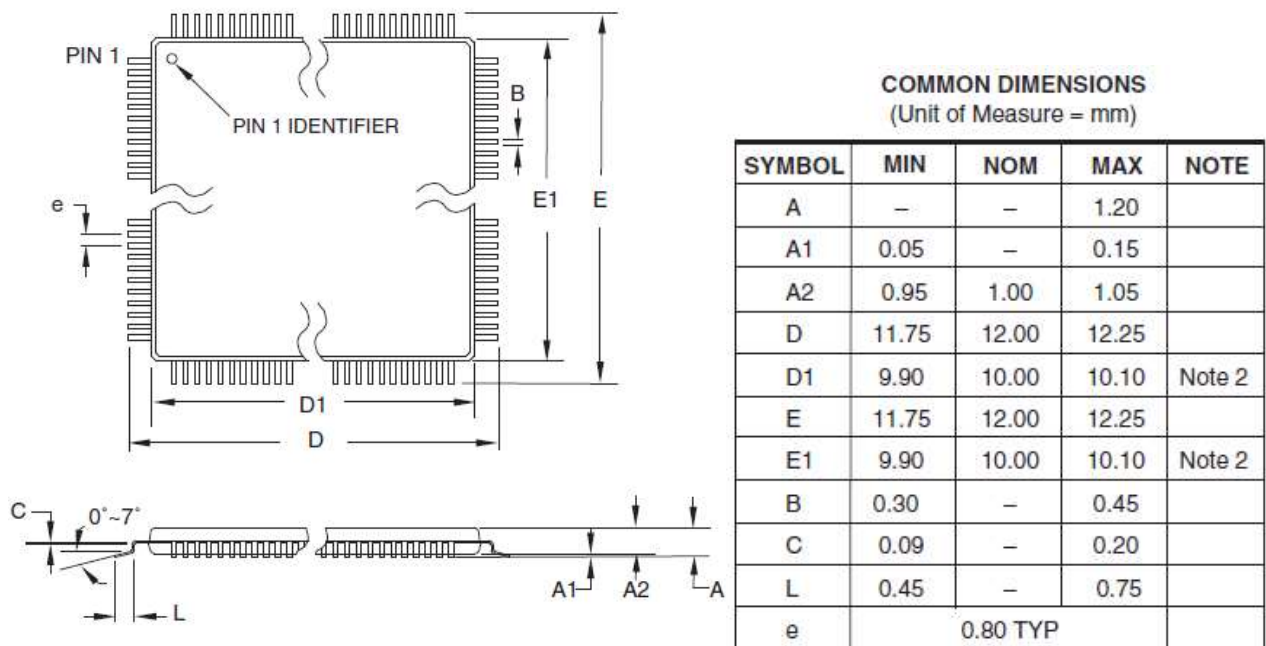


Рисунок 2.3 – Мікроконтролер ATmega16

Таблиця 2.1. Основні характеристики мікроконтроллера

Тактова частота	16 МГц
Розмір шини даних	8 біт
Розмір програмної пам'яті	16 кБайт
Розмір ОЗУ даних	512 Байт
Напруга живлення	5.5 В
Робоча температура	від -40 до 85 °С
Потужність	0,018 Ватт

### MEMS-модуль GY-521

GY-521 (рисунок 2.4) - модуль з гіроскопом, акселерометром і термометром на базі мікросхеми MPU-6050 використовується в аматорській робототехніці для визначення положення в просторі. Модуль GY-521 побудований на базі мікросхеми MPU6050. На платі модуля також розташована необхідна обв'язка MPU6050, включаючи підтягує резистори інтерфейсу I2C. Гіроскоп використовується для вимірювання лінійних прискорень, а акселерометр - кутових швидкостей. Спільне використання акселерометра і гіроскопа дозволяє визначити рух тіла в тривимірному просторі. Є зовнішнім приладом. Основні характеристики перераховані у таблиці 2.2.

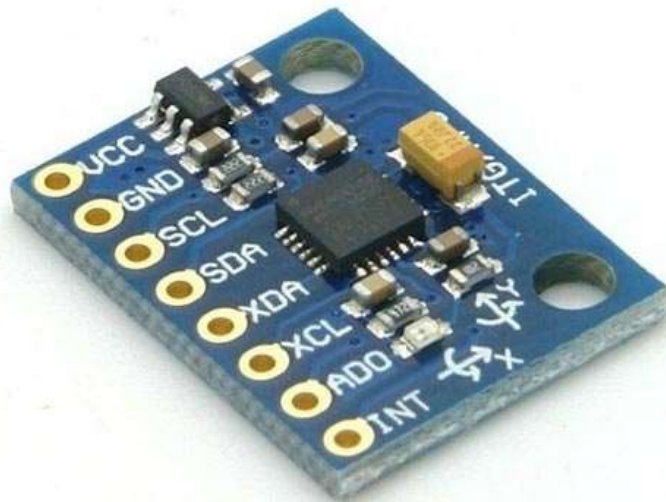


Рисунок 2.4 – MEMS-модуль GY-521

Таблиця 2.2. Основні параметри регулятора напруги

Живлення	3,5 – 6 В
Струм споживання	від 500 мкА до 10 мА
Чіп	MPU-6050
Чіп	16bit АЦП вбудований
Висновок даних	16 біт
Інтерфейс	I2C

Продовження таблиці 2.2.

Максимальна частота інтерфейсу	400 кГц
Акселерометр діапазон вимірювань	$\pm 2 \pm 4 \pm 8 \pm 16g$
Споживання акселерометра	350 $\mu A$
Гіроскоп діапазон вимірювань (градусів в секунду)	$\pm 250 \ 500 \ 1000 \ 2000 \text{ }^\circ /s$
Споживання гіроскопа	3,6 mA
Відстань між контактами	2,54 мм
Кріпильні отвори	під гвинт 3 мм
Розміри	2,0 см x 1,6 см x 0,3 см
Шум	$0,005 \text{ }^\circ / c / \sqrt{Гц}$

### Регулятор напруги LM7805

Трихштирькові позитивні регулятори напруги LM78M05 мають вбудоване обмеження струму, термічне відключення і захист безпечної зони, що робить їх практично несприйнятливими до пошкоджень від вихідних перевантажень.

При адекватному відводі тепла вони можуть видавати струм, що перевищує 0,5 А. Типові області застосування включають в себе місцеві (вбудовані) регулятори, які можуть усунути шум і погіршення характеристик, пов'язаних з однокрапковим регулюванням.

На рисунку 2.5 зображено LM7805 та його розміри. Основні параметри – в таблиці 2.3.

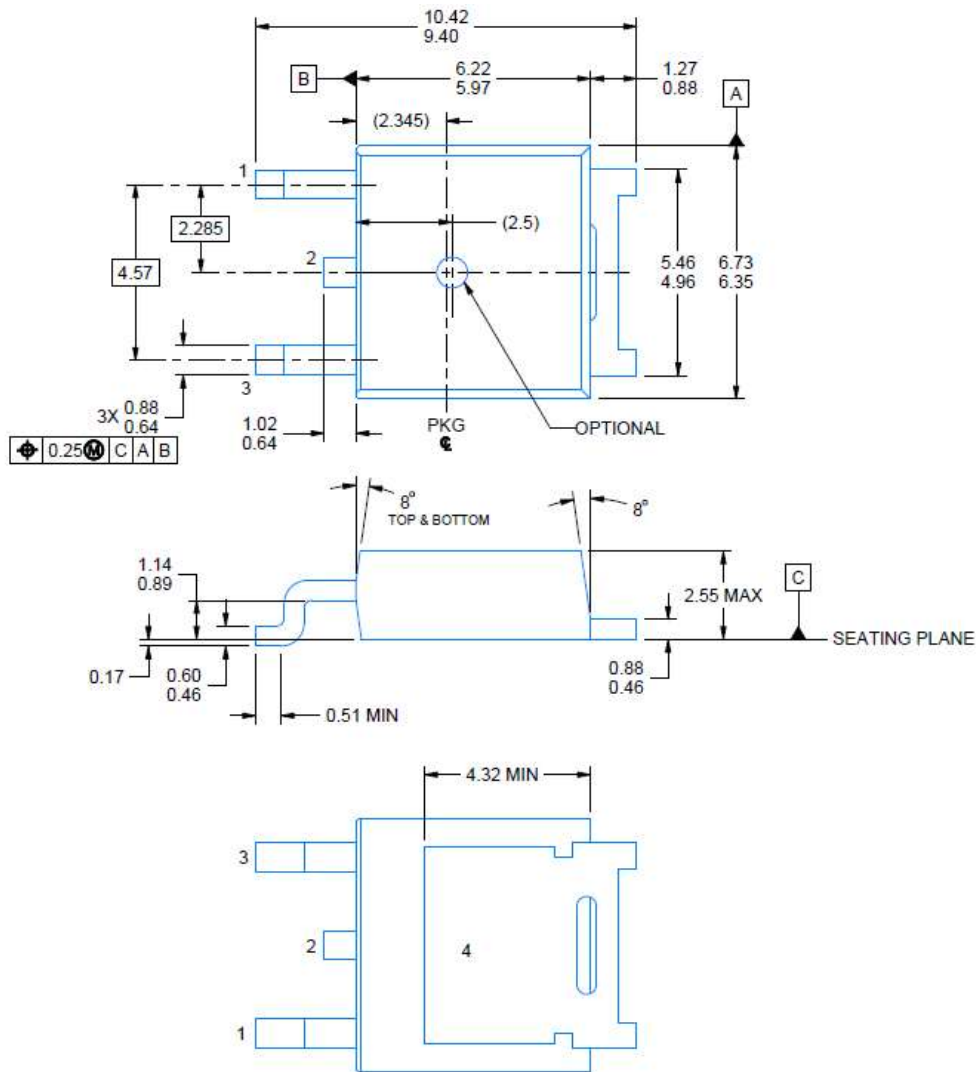


Рисунок 2.5 – Регулятор напруги LM78M05

Таблиця 2.3. Основні характеристики LM7805

Мінімальна вихідна напруга	5 В
Струм (поточний/вихідний)	3А
Максимальна вхідна напруга	26 В
Максимальна вихідна напруга	25 В
Падіння потужності	0.37 В
Робоча температура	-40°C ~ 125°C

## Драйвер Двигунів L293DD

Модуль драйверу, продемонстрований на рисунку 2.6, використовується для управління кроковими двигунами з напругою від 5 до 35 В. За допомогою однієї плати L298N можна управляти відразу двома двигунами. Найбільше навантаження, забезпечувано мікросхемою, досягає 2А на кожен двигун. Якщо підключити двигуни паралельно, це значення можна збільшити до 4А. У корпусу SO-20 (12+4+4). Основні характеристики наведено у таблиці 2.4.

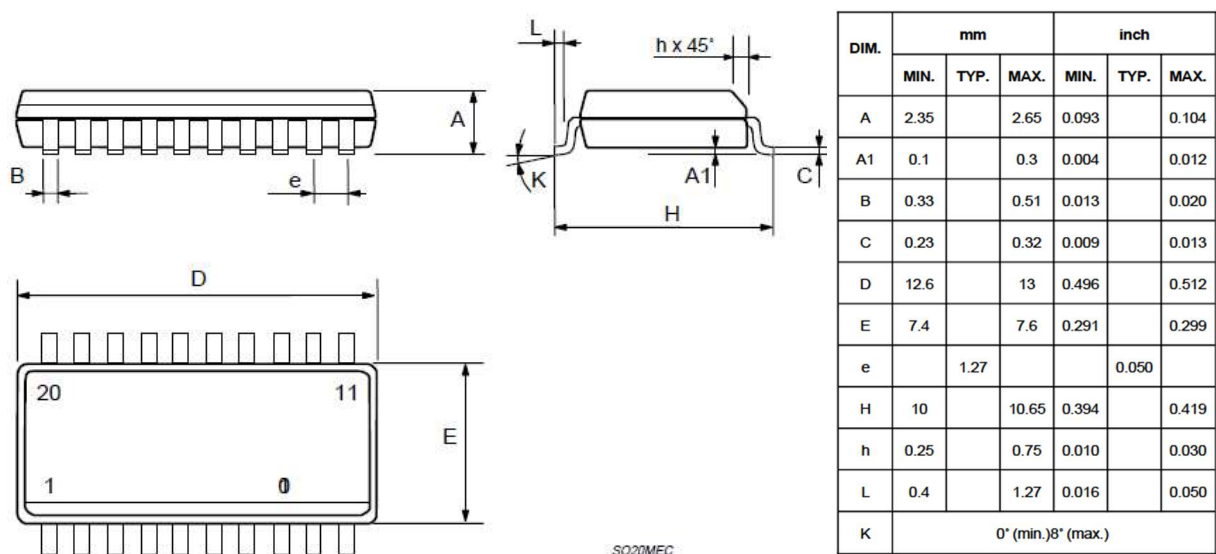


Рисунок 2.6 — Драйвер двигунів L293DD

Таблиця 2.4. Основні параметри драйверу

Напруга - вхід (макс.)	24 В
Напруга - вихід (мінімум / фіксований)	4.5 В
Напруга - вихід (макс.)	36 В
Робоча температура	-40°C ~ 150°C
Поточний - вихідний	0.6А
Падіння потужності	0.37 В

### Діод випрямний – 1N4148WS (D1, D2)

Діоди 1N4148WS (D1-D2) - електронний компонент з різною провідністю відповідно до напрямку струму [7]. В даному проекті діоди використовуються як захист від зворотного струму поряд з регулятором напруги. Діод 1N4148WS представлений на рисунку 2.7. Основні параметри елементу 1N4148WS наведені в таблиці 2.5.

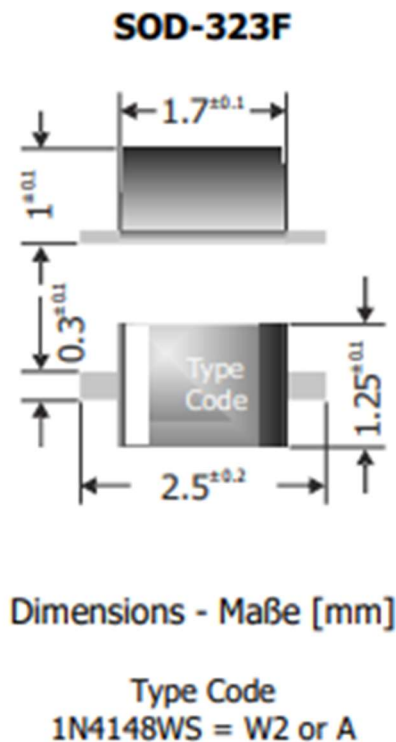


Рисунок 2.7 – Діод 1N4148WS

Таблиця 2.5. Основні параметри елементу 1N4148WS

Максимальний довготривалий прямий струм при 75 °C	24 В
Напруга - вихід (мінімум / фіксований)	4.5 В
Напруга - вихід (макс.)	36 В
Робоча температура	-65°C ~ 175°C
Поточний - вихідний	0.А
Падіння потужності	0.37 В

### Стабілітрон – VZX55C3V6 (D3, D4)

На рисунку 2.8 зображено стабілітрон, в таблиці 2.6 перераховані розмір елементів.

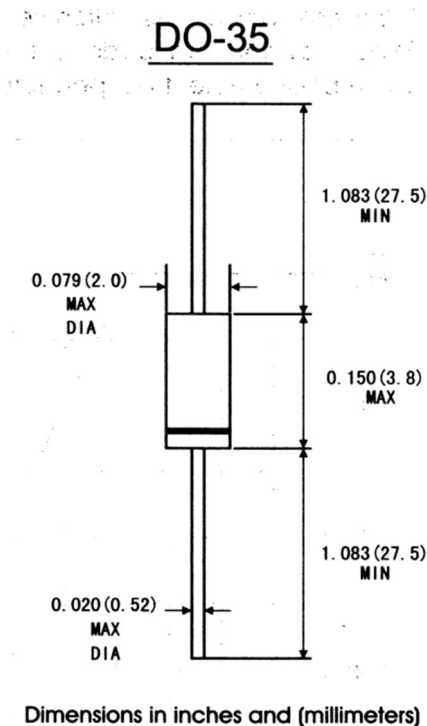


Рисунок 2.8 – Стабілітрон VZX55C3V6

Таблиця 2.6. Основні параметри елемента VZX55C3V6

Потужність розсіювання, Вт	0.5
Мінімальна напруга стабілізації, В	3.4
Номінальна напруга стабілізації, В	3.6
Максимальна напруга стабілізації, В	3.8
Статичний опір R <sub>ст.</sub> , Ом	89
при струмі I <sub>ст.</sub> , мА	5
Температурний коефіцієнт напруги стабілізації α <sub>уст.</sub> , % / °C	-0.04
Максимальний струм стабілізації I <sub>ст.макс.</sub> , мА	105
Робоча температура, °C	-55...150



### Резистор RK73B2HTTE103J (R1)

На рисунку 2.9 зображено резистор, в таблиці 2.7 перераховані розміри елементів, в таблиці 2.8 – основні параметри елементів.

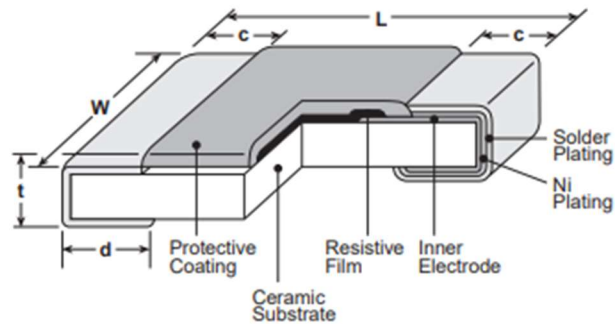


Рисунок 2.9 – Резистор RC0402FR-07100KL

Таблиця 2.7. Розміри резистора RC0402FR-07100KL

L	W	t	c	d
5±0.2	2.50±0.2	0.7±0.05	0.5±0.3	0.4±0.2

Таблиця 2.8. Основні параметри елементу RC0402FR-07100KL

Опір R1	10 кОм
Відхилення ємності	±5%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 155°C
Потужність	0.75W

### Резистори SPP1UL68R0JLF (R2, R3)

На рисунку 2.10 зображено резистор, на ньому ж і розміри, в таблиці 2.9 – основні параметри елементів.

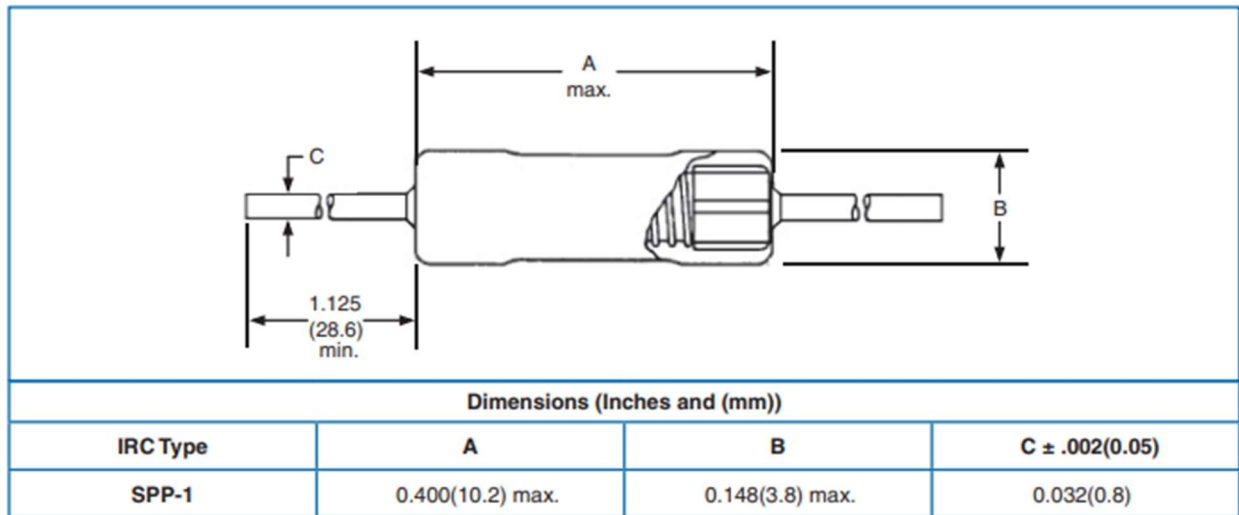


Рисунок 2.10 – Резистор SPP1UL68R0JLF

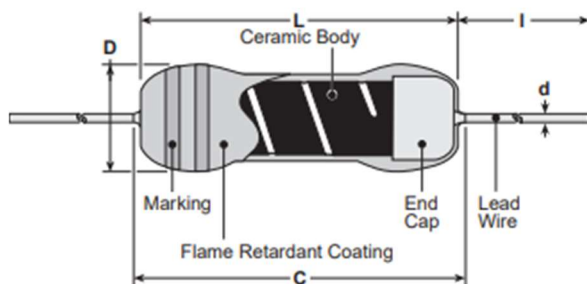
Таблиця 2.9. Основні параметри елементу SPP1UL68R0JLF

Опір R2, R3	68 Ом
Відхилення ємності	±5%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 200°C
Потужність	1 W

### Резистор MOS1CT528R222J (R4)

На рисунку 2.11 зображено резистор, в ньому ж зображено розмір елементів, в таблиці 2.10 – основні параметри елементів.

#### dimensions and construction



Type	Dimensions inches (mm)				
	L	C (max.)	D	d (nom.) <sup>1</sup>	l <sup>*</sup>
MOS1/2	.244±.02 (6.2±0.5)	.280 (7.1)	.098±.02 (2.5±0.5)	.024 (0.6)	.945 Min. (24.0 Min.)
MOSX1/2	.354±.039 (9.0±1.0)	.437 (11.1)	.118±.02 (3.0±0.5)	.024/.031 (0.6)/(0.8)	
MOS2	.472±.039 (12.0±1.0)	.591 (15.0)	.157±.02 (4.0±0.5)	.031 (0.8)	1.18±.118 (30.0±3.0)
MOSX2	.610±.039 (15.5±1.0)	.709 (18.0)	.236±.039 (6.0±1.0)		
MOS3	.965±.039 (24.5±1.0)	1.10 (28.0)	.354±.039 (9.0±1.0)	.031 (0.8)	1.50±.118 (38.0±3.0)
MOSX3	.965±.039 (24.5±1.0)	1.10 (28.0)	.354±.039 (9.0±1.0)		

\* Lead length changes depending on taping and forming type.

<sup>1</sup> Ex. MOS1C, 1CT52, 1CT526 = 0.6MM  
MOS1C8, 1CT528 = 0.8MM

Рисунок 2.11 — Резистор RC0402FR-07100KL

Таблиця 2.10. Основні параметри елементу SPP1UL68R0JLF

Опір R4	2k20м
Відхилення ємності	±5%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 200°C
Потужність	1 W

### Кварцовий резонатор GEYER KX-9BT 16.0 MHz 50/100ppm 16pF (Q1)

У контролерах ATmega16 є внутрішній кварцовий генератор працює на частоті 8 МГц, тобто якщо нам не дуже важлива частота, то в зовнішнє обв'язку можна зовнішній кварц і не включати. Більшість плат Arduino працює на частоті 16 МГц, в зв'язку з цим необхідна установка зовнішнього кварцу.

На рисунку 2.12 зображено резистор, в таблиці 3.6 перераховані розміри елементів, в таблиці 2.11 – основні параметри елементів.

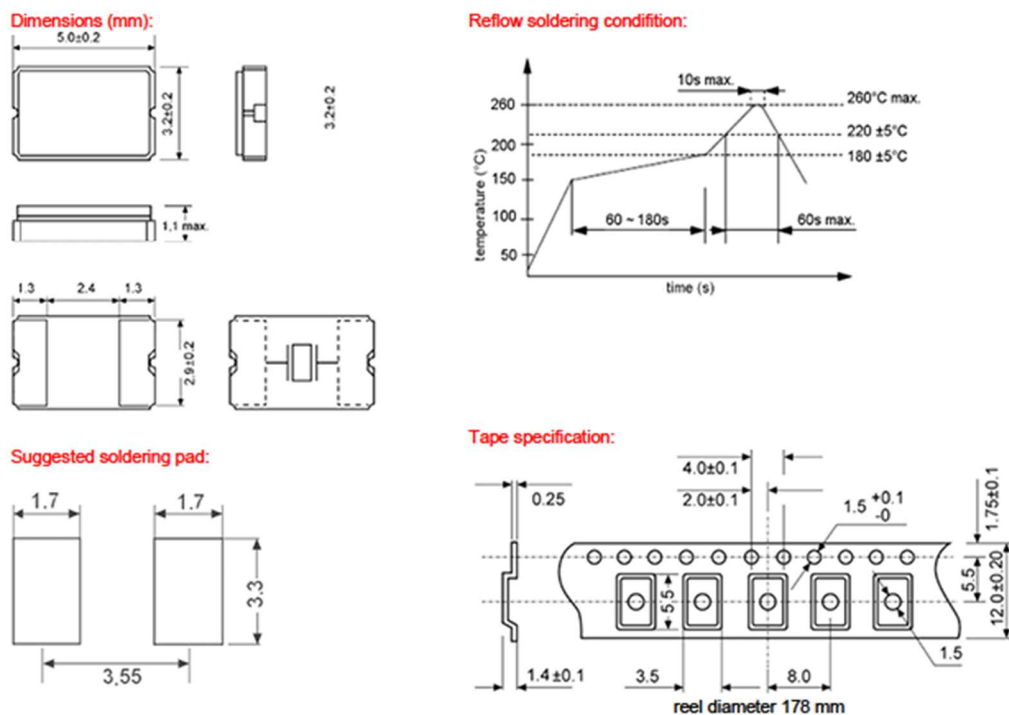


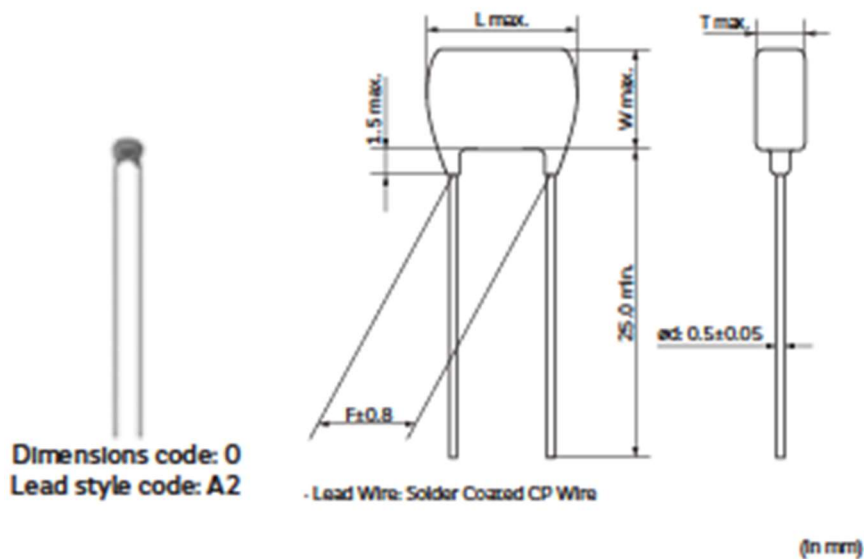
Рисунок 2.12 – Кварцовий резонатор GEYER KX-9BT

Таблиця 2.11. Основні параметри елементу GEYER KX-9BT

Частота	16Mhz
Стабільність при 25 ° C	50ppm
Стабільність в робочому температурному діапазоні	100ppm
Монтаж	SMD
Здатність навантаження ємність	16пФ
Робоча температура	-40°C ~85°C
Розмір	5×3.2×1 мм

### Конденсатор RDE5C1H220J0P1H03B (C1, C2)

На рисунку 2.13 зображено конденсатор керамічний DE5C1H220J0P1H03B та його розміри, в таблиці 2.12 перераховані основні параметри елемента.



### Dimensions

Dimensions and Lead Style Code	Dimensions (mm)					
	L	W	W1	T	F	d
0A2/0DB	3.6	3.5	-		2.5	0.5
0K1/0M1	3.6	3.5	6.0		5.0	0.5
1A2/1DB	4.0	3.5	-		2.5	0.5
1K1/1M1	4.0	3.5	5.0		5.0	0.5
2A2/2DB	5.5	4.0	-		2.5	0.5
2K1/2M1	5.5	4.0	6.0	See the individual product specification	5.0	0.5
3A2/3DB	5.5	5.0	-		2.5	0.5

Рисунок 2.13 – Конденсатор керамічний 194D

Таблиця 2.12. Основні параметри елемента 194D104X9025A2B

Ємність	22pF
Відхилення ємності	±5%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 125°C
Номінальна напруга	50В
Розміри	5x2.5x3.5mm

### Конденсатор 194D104X9025A2B (C3, C7)

На рисунку 2.14 зображен конденсатор танталовий 194D104X9025A2B та його розміри, в таблиці 2.13 перераховані основні параметри елемента.



DIMENSIONS in inches [millimeters]						
CASE CODE	W	L	H	P	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub> MAX.
A	0.050 ± 0.015 [1.27 ± 0.38]	0.100 ± 0.015 [2.54 ± 0.38]	0.050 ± 0.015 [1.27 ± 0.38]	0.030 ± 0.005 [0.76 ± 0.13]	0.005 [0.13]	0.015 [0.38]

Рисунок 2.14 – Конденсатор танталовий 194D

Таблиця 2.13. Основні параметри елемента 194D104X9025A2B

Ємність	0.1uF
Відхилення ємності	±10%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 85°C
Номінальна напруга	25В

### Конденсатор SA405A103JAA (C4, C8-C12)

Далі під C4, C8, C9, C10, C11, C12 було обрано керамічний конденсатор, з корпусом під пайку АХР з ємністю 0.1uF. Нижче, на рисунку 2.15, а характеристики у таблиці 2.14.

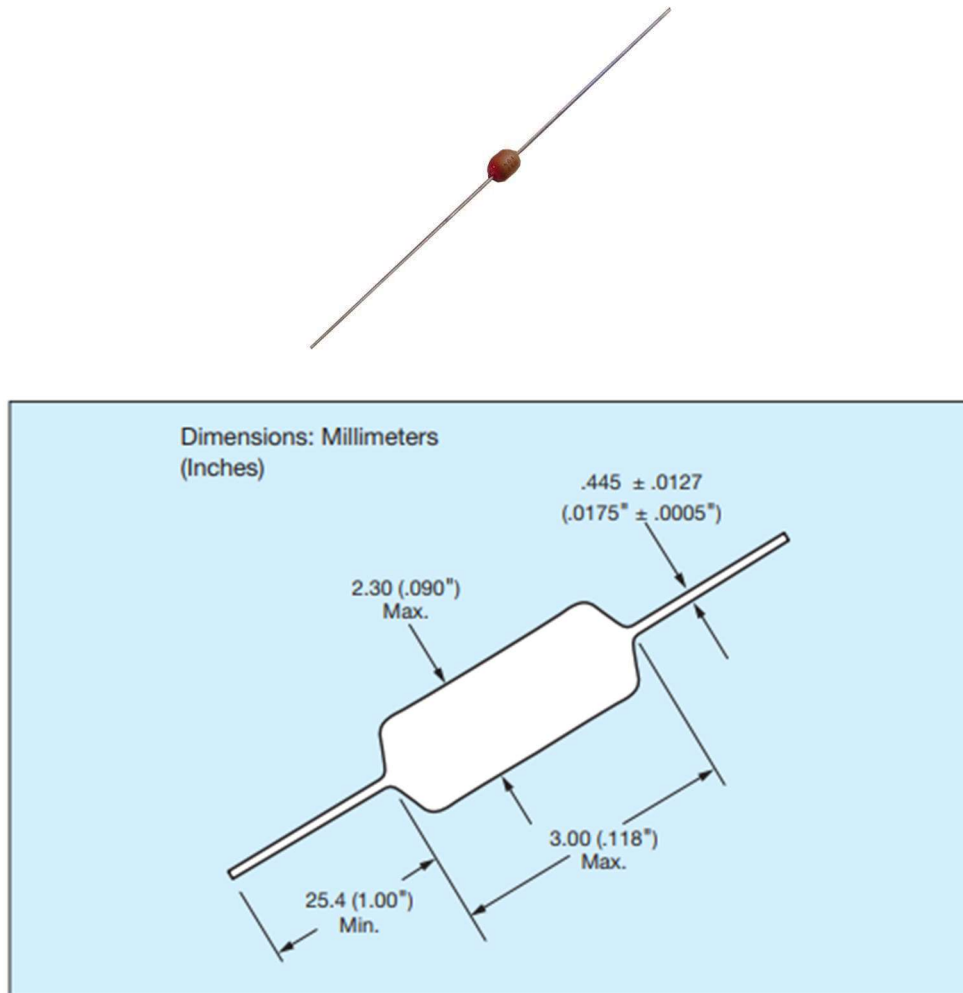


Рисунок 2.15 – Конденсатор керамічний SA405A103JAA

Таблиця 2.14 — Основні параметри елемента SA405A103JAA

Ємність	0.1uF
Відхилення ємності	±5%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 125°C
Номінальна напруга	50В
Длина	10.16mm

### Конденсатор електролітичний ЕЕЕ-FT1E471AP (C5)

На рисунку 2.16 зображено конденсатор ЕЕЕ-FT1E471AP та його розміри (розмір F), в таблиці 2.15 перераховані основні параметри елемента.

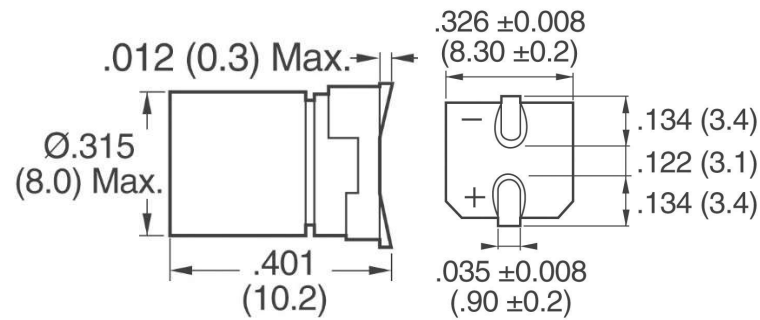


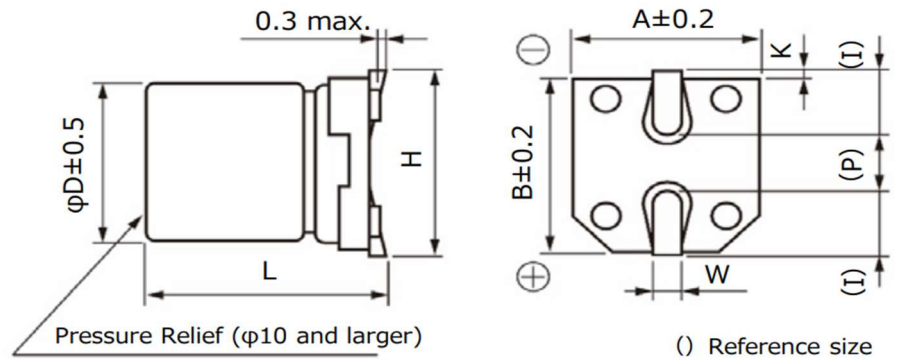
Рисунок 2.16 — конденсатор ЕЕЕ-1АА331Р

Таблиця 2.15 — Основні параметри елемента ЕЕЕ-1АА331Р

Ємність	470μF
Відхилення ємності	±20%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 105°C
Мінімальне напрацювання	2000 годин
Номінальна напруга	25В

### Конденсатор електролітичний ЕЕЕ-FTA471XAP (C6)

На рисунку 2.17 зображено конденсатор ЕЕЕ-FT1E471AP та його розміри (розмір D8), в таблиці 2.16 перераховані основні параметри елемента.



Unit : mm

Size code	φD	L	A, B	H	I	W	P	K
B	4.0	5.8±0.3	4.3	5.5 max.	1.8	0.65±0.1	1.0	0.35 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.20</sub>
C	5.0	5.8±0.3	5.3	6.5 max.	2.2	0.65±0.1	1.5	0.35 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.20</sub>
D	6.3	5.8±0.3	6.6	7.8 max.	2.6	0.65±0.1	1.8	0.35 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.20</sub>
D8	6.3	7.7±0.3	6.6	7.8 max.	2.6	0.65±0.1	1.8	0.35 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.20</sub>

Рисунок 2.17 — конденсатор ЕЕЕ-1АА331Р

Таблиця 2.16 — Основні параметри елемента ЕЕЕ-1АА331Р

Ємність	470μF
Відхилення ємності	±20%
Температура навколишнього середовища	-55°C ~ 105°C
Мінімальне напруження	2000 годин
Номінальна напруга	10В

### Конденсатор електролітичний ЕЕЕ-НС1С101ХР (С13, С14)

На рисунку 2.18 зображено конденсатор ЕЕЕ-FT1Е471АР та його розміри, в таблиці 2.17 перераховані основні параметри елемента

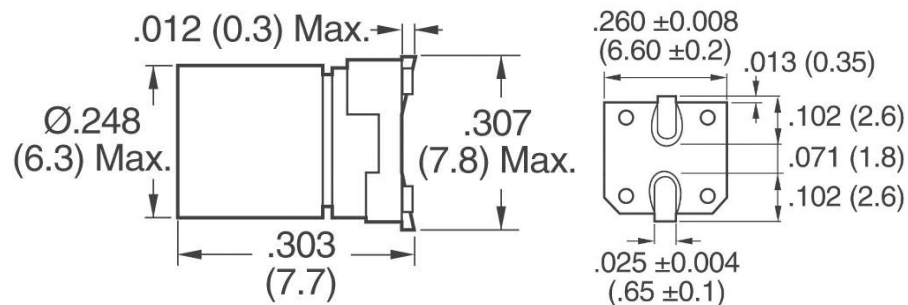


Рисунок 2.18 — Конденсатор ЕЕЕ-1АА331Р



Таблиця 2.17 — Основні параметри елемента EEE-1AA331P

Ємність	100 $\mu$ F
Відхилення ємності	$\pm 20\%$
Температура навколишнього середовища	-40 $^{\circ}$ C ~ 105 $^{\circ}$ C
Мінімальне напрацювання	3000 годин
Номінальна напруга	16В

### Клемний блок WAGO 2060-452 (X7, X8)

Клемний блок Wago2060-452 - виріб для підключення проводів. Представляє пару (або більше) металевих контактів з вузлами кріплення до них проводів в діелектричному корпусі. Клемний блок Wago2060-452 представлений на рисунку 2.19. Основні параметри елемента Wago2060-452 наведені в таблиці 2.18.



Рисунок 2.19 – Клемний блок Wago2060-452

Таблиця 2.18. Основні параметри елемента Wago2060-452

Матеріал корпусу	PPA GF, UL94-V0
Напруга (мінімальна)	0.05 (В)
Напруга (максимальна)	320.0 (В)
Робоча температура	-60....+105 $^{\circ}$ C

Продовження таблиці 2.18

Шаг	4 мм
Матеріал контакту	Хромонікелева пружинна сталь
Тип кріплення жил дроту	Кнопковий

### Кнопка В3F-1000 (S1)

Кнопка В3F-1000 – механічний пристрій, призначений для передачі електричних сигналів на різні пристрої шляхом закриття або відкриття двох або більше контактів.

На рисунку 2.20 зображено кнопку натискну В3F-1000 та її розміри, в таблиці 2.19 перераховані основні параметри елемента.

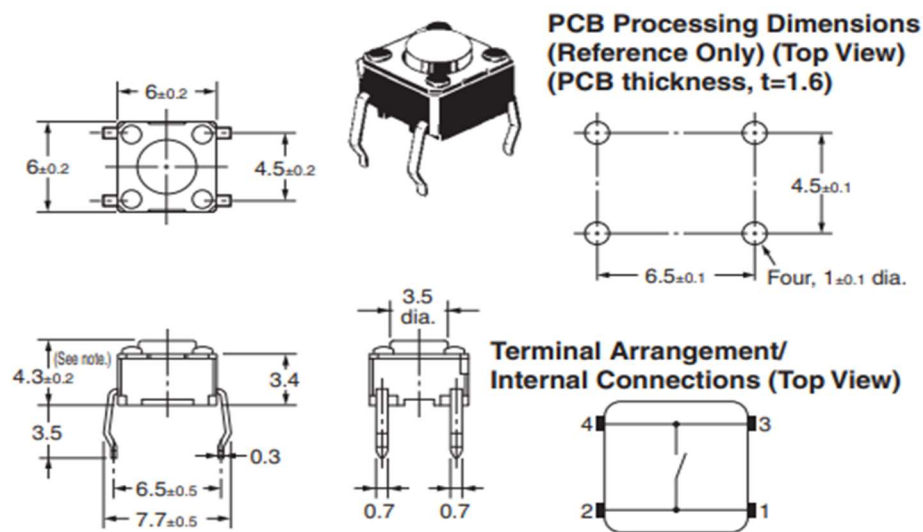


Рисунок 2.20 – Кнопка В3F-1000

Таблиця 2.19 — Основні параметри кнопки

Зносостійкість	1 000 000 циклів
Діапазон робочих температур	-25...+70°C
Діапазон температур зберігання	-40...+90°C

### Кроковий двигун 5V 28BYJ-48

П'ятивольтовий кроковий двигун 28BYJ-48 5В, використовується в робототехніці, ДІУ-пристроях, поворотних жалюзі кондиціонерів, невеликих вентиляторах і т.п. Всі технічні параметри відповідають національному електронному стандарту SJ / T10689-95 а розміри можна побачити на рисунку 3.18.

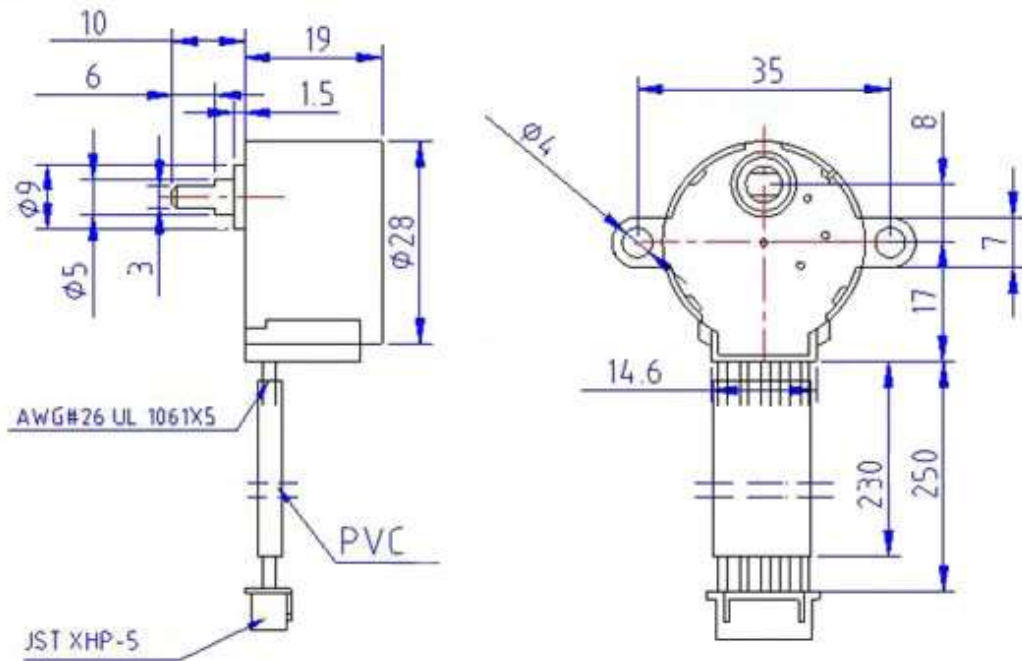


Рисунок 2.21 – Кроковий двигун 5V 28BYJ-48

Таблиця 2.20 – Характеристики двигуна

Номінальна напруга живлення	5В
Кількість фаз	4
Кількість кроків	64
Кількість мікрошагов	4096
Крок	5.625 Градусів
Номінальна частота	100 Гц
Номінальний опір обмоток (при 25 Градусах)	50 Ом

Продовження таблиці 2.20

Піковий струм однієї обмотки	близько 320 мА
Частота холостого ходу (за годинниковою стрілкою)	600 Гц
Частота холостого ходу (проти годинникової стрілки)	1000 Гц
Крутний момент (за годинниковою стрілкою, при частоті 120 Гц)	34,3 Н/м
Момент тертя (опір обертанню)	600-1200 г/см
Номінальна тяга	343 г / см
Клас електробезпеки	А
Рівень шуму	<40dB

### Вилка штирєва PLS-4 DS-1021-1x4 (I2C, UART)

Коннектор на плату для з'єднання приладів через дрiт. Вигляд можна побачити на рисунку 2.22. Параметри коннектору у таблиці 2.21.

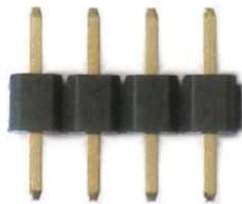


Рисунок 2.22 – Вилка штирєва

Таблиця 2.21 – Основні параметри вилки штирєвої

Типорозмір	1
Функціональне призначення	вилка на плату
Серія	pls

Продовження таблиця 2.21

Кількість рядів	1
Кількість контактів в ряду	4
Крок контактів, мм	2,54
Матеріал ізолятора	Полімерний, усиленний стекловолокном
Максимальне напруження не менше, В	500vac, 1 хв
Вага, г	0,2

### Дріт з'єднувач типу JST Encoder Breakout Cable 4x1

Дріт працює зв'язуючою ланкою між MEMS-модулем GY-521 та платою нового пристроя. На рисунку 2.23 його вигляд, у таблиці 2.24 параметри.

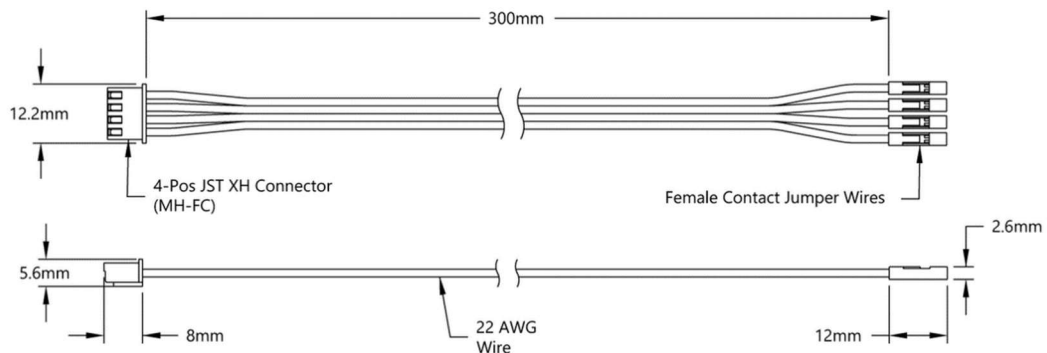


Рисунок 2.23 – Дріт JST

Таблиця 2.22 – Основні параметри дроту JST

Серія дротів	22AWG
Матеріал кожуху	ABS Пластик
Матеріал дроту	Багатожильний мідний

### 2.1.5 Розробка конструкції друкованої плати

Розробка конструкції друкованої плати має такі основні стадії:

- обґрунтування обраного типу друкованої плати;
- попереднє розміщення елементів;
- обґрунтування обраного класу точності друкованої плати;
- трасування провідників і розміщення елементів;
- вибір матеріалу, габаритних розмірів і конфігурації друкованої плати;
- розробка конструкторської документації друкованої плати.

Для розробки пристрою була обрана двостороння друкована плата.

Відповідно до положень ГОСТ 23751-86 [6], точність компонентів на друкованій платі поділяється на п'ять рівнів точності.

У цьому курсовому проекті обирається другий рівень точності, оскільки плата другого рівня точності є надійнішою і дешевшою, ніж рівні вищого рівня. Плати другого класу точності мають такі конструктивні параметри:

- мінімальне ширина провідника  $t = 0.45$  мм;
- запас пояску  $b = 0.2$  мм;
- мінімальна відстань між провідниками  $S = 0.45$  мм;
- допуск на розташування осей отворів  $T_d = 0.15$  мм;
- максимальне відхилення діаметра отвору  $\Delta d = \pm 0.15$  мм;
- допуск на розташування центрів контактних площадок  $T_D = 0.25$  мм.
- граничне відхилення ширини друкованого провідника  $\Delta t = \pm 0.1$  мм;

Матеріалом виготовлення друкованої плати виступає склотекстоліт, облицьований фольгою з оксиду міді (СФ-1-35) [1]. Товщина фольги - 50 мкм, а ширина доріжки - 0.93 мм. Товщина друкованої плати - 1.5 мм. Робочий діапазон температур: від  $-60^\circ \text{C}$  до  $+85^\circ \text{C}$ . Загальний розмір друкованої плати – 99.06 мм на 69.85 мм.

Діаметр отвору під висновок вибирають з умови отримання зазору між висновком і стінкою отвори, що забезпечує капілярний проникнення припою в процесі пайки [5].

Мінімальний діаметр контактної колодки  $D$  навколо монтажного отвору з відомим діаметром  $d$  визначається наступною формулою

$$D = d + \Delta d_{\text{в.о.}} + 2b_{\text{н}} + \Delta t_{\text{в.про}} + 2\Delta d_{\text{тр}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{н.о.}}^2)^{0.5}$$

де  $\Delta d_{\text{в.о.}}$  - верхнє граничне відхилення діаметра отвору - 0.15 мм;

$b_{\text{н}}$  - гарантійний поясок на зовнішньому шарі - 0.2 мм;

$t_{\text{в.про}}$  та  $t_{\text{н.о.}}$  - верхнє і нижнє граничні відхилення ширини провідника - 0.1 мм;

$\Delta d_{\text{тр}}$  - значення підщавлювання діелектрика (для двосторонніх плат = 0.03);

$T_d$  - допуск на розташування осей отворів для відповідного класу точності і розмірів плати - 0.15 мм;

$T_D$  - допуск на розташування контактних площадок для відповідного класу точності і розмірів плати - 0.25 мм.

Діаметри отворів живлення

$$d_{\text{отв}} \approx 1.2 \text{ мм}$$

$$D_1 = 1.2 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 2.2 \text{ мм}$$

Діаметри отворів USB-коннектору

$$d_{\text{отв}} \approx 2.3 \text{ мм та } d_{\text{отв}} \approx 1 \text{ мм}$$

$$D_1 = 2.3 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 3.3 \text{ мм}$$

$$D_1 = 1 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 2 \text{ мм}$$

Діаметр

$$d_{\text{отв}} \approx 0.9 \text{ мм}$$

$$D_1 = 0.9 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 1.9 \text{ мм}$$

Діаметр

$$d_{\text{отв}} \approx 1.1 \text{ мм}$$

$$D_1 = 1.1 + 0.15 + 0.4 + 0.1 + 0.06 + (\sqrt{0.15^2 + 0.25^2 + 0.1^2}) = 2.1 \text{ мм}$$

Детальні правила впровадження креслення друкованої плати були сформульовані ГОСТ 2.417-91 [3]. Розміри на схемі друкованої плати представлені сіткою в прямокутній системі координат. Розмір кроку сітки - 1,27 мм. Сітка прикладається до частини поверхні друкованої плати. Візьміть нижній лівий кут друкованої плати за вихідну точку [5].













Діаметр отвору, його символ, діаметр контактної колодки, наявність металізації та кількість отворів поєднані в таблиці 2.23. Розміри та кількість контактних площадок перераховані в таблиці 2.24.

Таблиця 2.23. Характеристики монтажних отворів

Символ	Діаметр отворів, мм	Наявність металізації в отворі	Кількість отворів	Мінімальний діаметр контактної площадки, мм
	0.9	без металізації	4	1.9
	0.9	без металізації	4	1.9
	0.9	без металізації	6	1.9
	1.1	без металізації	8	2.1
	1	без металізації	4	2
	1	без металізації	12	2
	1.2	без металізації	2	2.2
	2.3	без металізації	2	2.9
	2.6	без металізації	4	-



Таблиця 2.24. Характеристики контактних площадок

Символ	Кількість	Розмір, мм
	44	1.5x0.5
	20	2.2x0.6
	2	1.7x3.3
	4	3x1.4
	4	3x2.5
	2	1.6x1.8
	4	3.5x2
	4	6x2
	4	1.05x1.08
	1	5.4x6.2
	2	1x1.6
	4	1x0.6

### 2.1.6 Розробка конструкції друкованого вузла

Навісні елементи на друкованій платі встановлюються відповідно до ДСТУ 2779-94 [8], тобто в отвори друкованої плати. Стандарт [8] передбачає при установці будь-яких елементів на друкованих платах мінімальний розмір від корпусу елемента до центра кола вигину при формуванні висновків - 1 мм.

Креслення пристрою продемонстровано на рисунку 2.24, друкована плата (сторона 1) – рисунок 2.25 і друкована плата (сторона 2) – рисунок 2.26.

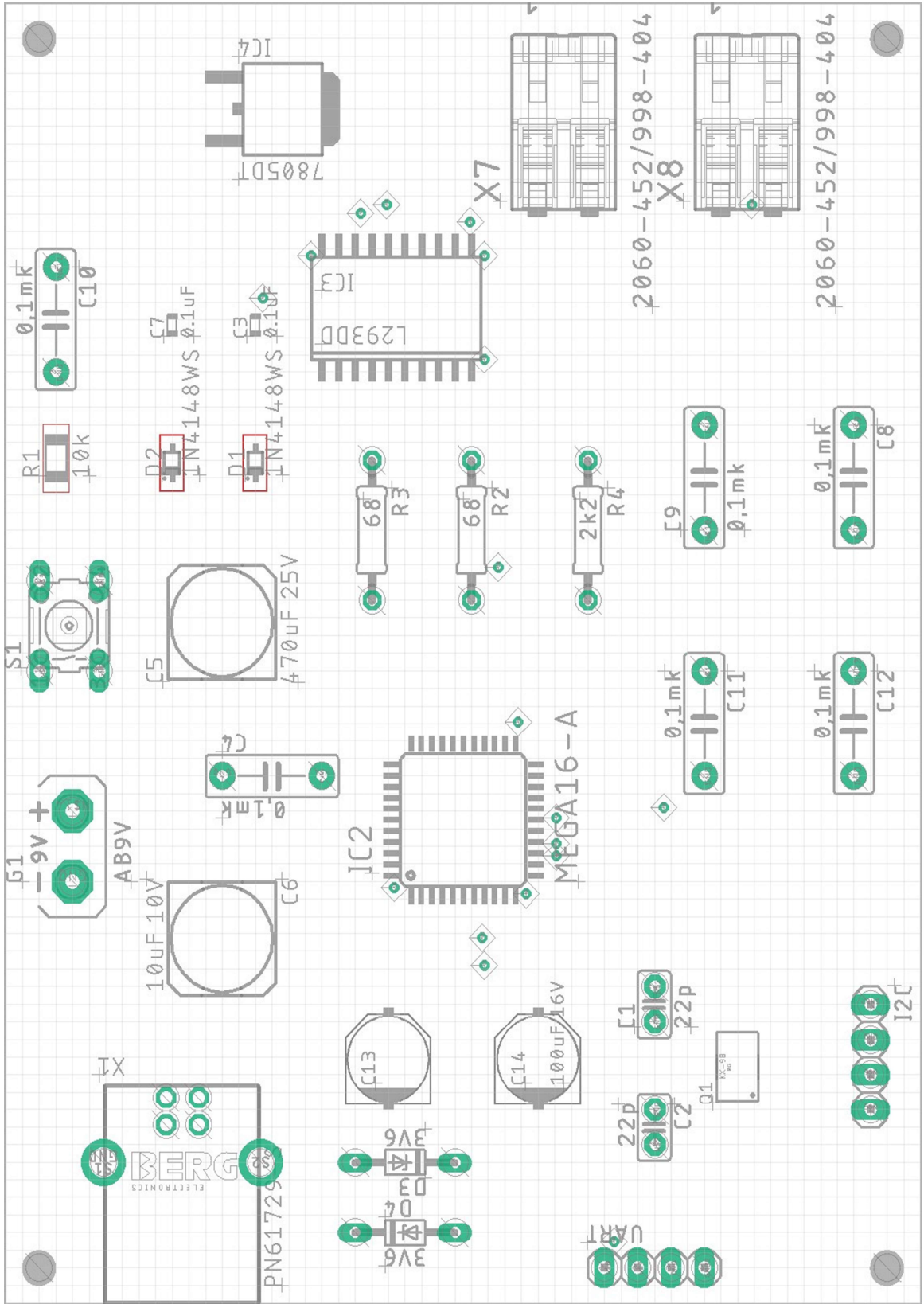


Рисунок 2.24 – Складальне креслення пристрою

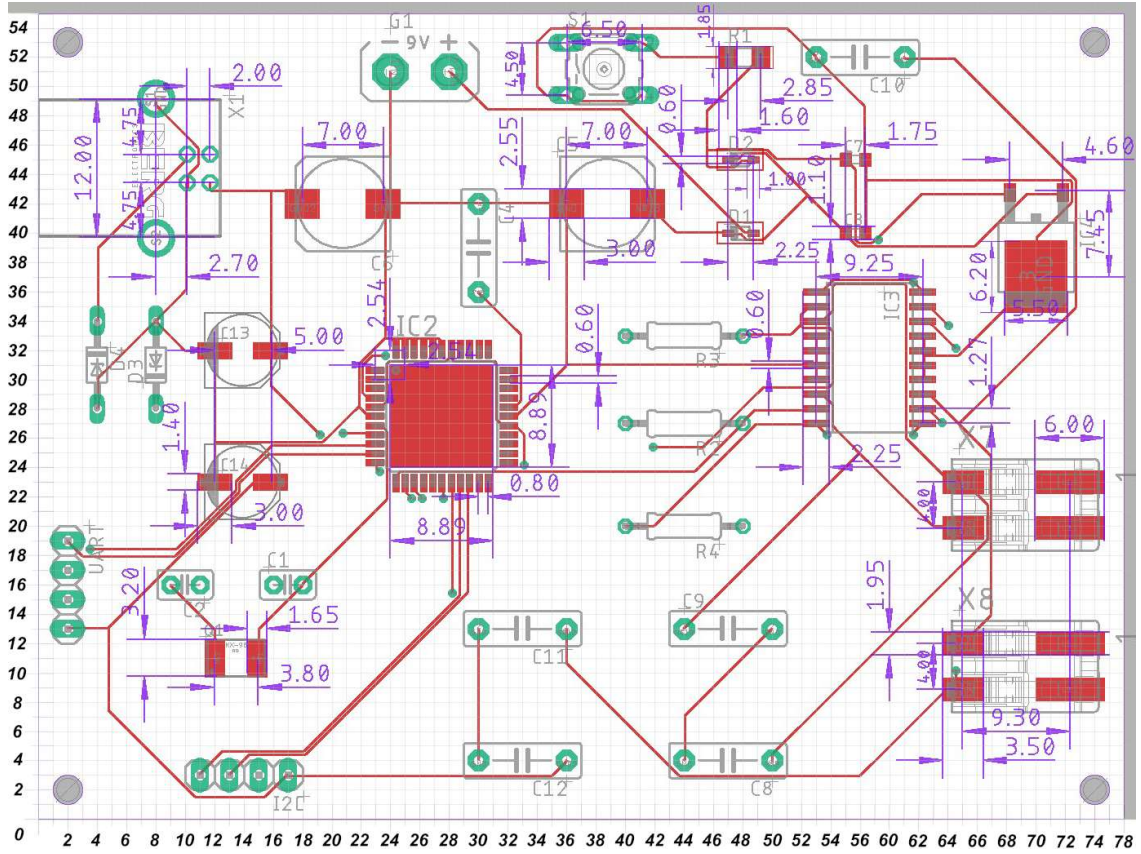


Рисунок 2.25 – Друкована плата (сторона 1)

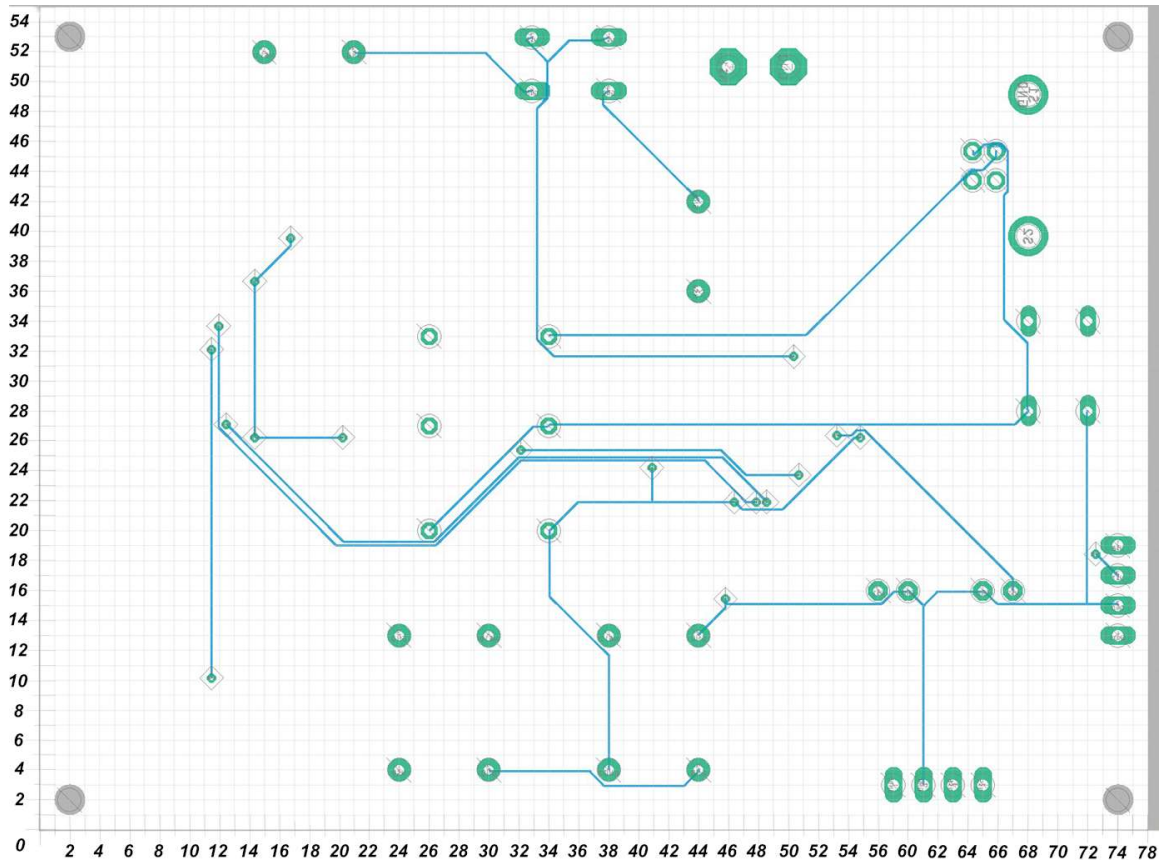


Рисунок 2.26 – Друкована плата (сторона 2)

### 2.1.7 Вибір умов охолодження і розрахунок теплового режиму.

Під час роботи, температура пристрою не повинна перевищувати заданих технічними умовами значень.

У конструкції необхідні температурні умови досягаються шляхом застосування відповідних умов охолодження та розумної компоновки в конструкції.

#### Попередній вибір системи охолодження

Початковий вибір системи охолодження здійснюється за допомогою діаграм, які характеризують відповідне використання різних методів охолодження.

Оцінка заснована на попередніх даних про тепловий потік на одиницю площі:

$$p = \frac{P * k_p}{S_n}$$

де  $P = \sum p_i$  – загальна розсіяна потужність електронного обладнання, де  $p_i$  - потужність кожного елемента окремо.

$k_p$  – коефіцієнт, що враховує тиск повітря ( $k_p = 1$ );

$S_n = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2)l_3 k_3]$  – поверхня теплообміну, обумовлена геометричними розмірами корпусу електронного пристрою, тобто довжиною  $l_1$ , шириною  $l_2$  основи пристрою і його висотою  $l_3$ , а також коефіцієнтом заповнення об'єму  $k_3 = \frac{V_{ап}}{V_{об}}$ , де  $V_{ап}$  - об'єм апаратури,  $V_{об}$  - об'єм об'єкта.

Корпус створюваного приладу прямокутний і має розміри:  
99.06x69.85 x10.5 мм

$$P = 0.0036 * 5 + 0.37 * 3 + 0.36 * 0.6 + 0.5 + 0.01 * 12 + 0.5 + 0.75 + 0.5 + 0.5 \\ = 4.22 \text{ (Вт)}$$

$$\begin{aligned}
 V_{\text{ан}} = & 1.2 * 12.25 * 2 + 6.75 * 10.4 * 2.55 + 2.35 * 12.5 * 7.4 + 1.25 * 2.5 * 1 * 2 \\
 & + 3.8 * 2 * 2 + 5 * 2.5 * 0.7 + 10.2 * 3.8 * 2 + 9 * 3 + 5 * 3.2 + 5 \\
 & * 2.5 * 3.5 * 2 + 1.27 * 2.54 * 2 + 3 * 2.30 * 5 + 10.2 * 8.3 * 8.3 \\
 & + ((6.6 * 6.6 * 7.7) * 2) + (12.7 * 4.5 * 7.9) * 2 + 6 * 6 * 4.3 + 11.92 \\
 & * 18.65 * 4.5 = 4138.2238 \text{ (мм}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

$$V_{\text{об}} = 99.06 * 69.85 * 10.5 = 72653.0805 \text{ (мм}^2\text{)}$$

$$k_3 = \frac{4136.6146}{72653.0805} = 0.057$$

$$\begin{aligned}
 S_n = & 2 * (99.06 * 69.85 + (99.06 + 69.85) * 10.5 * k_3) = 14040.7207 \text{ (мм}^2\text{)} \\
 & = 0.1404 \text{ (м}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

$$p = \frac{4.22 * 1}{0.1404} = 30.06$$

$$\lg p = 1.478$$

Другим вхідним параметром є величина мінімально припустимого перегріву елементів пристрою  $\Delta T_{i \min} = T_{i \min} - T_c$ ,

де  $T_{i \min}$  – припустима температура корпуса найменш теплостійкого елемента;

$T_c$  – температура навколишнього середовища.

$$\Delta T_{i \min} = 85 - 45 = 40$$

На рисунку 2.27 показано належну область застосування різних методів охолодження в системі координат  $\Delta T_c, \lg p$  у цих системах координат. Можна зробити висновок, що для охолоджуючого обладнання необхідне достатнє охолодження природного повітря, але тому що пристрій майже виходит з зони природного, було б про всяк випадок поставити якесь примусове охолодження, на кшталт радіатора.

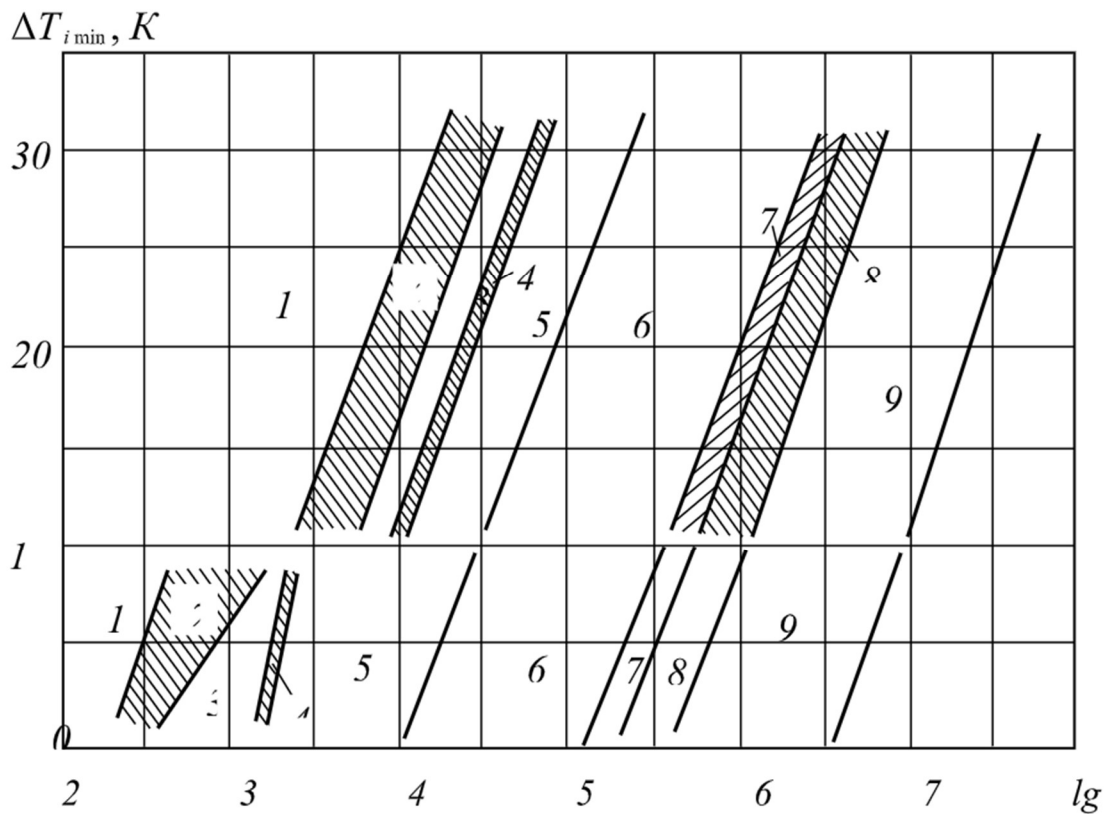


Рисунок 2.27 – Области доцільного застосування різних способів охолодження

1 – природне повітряне; 2 – природне і примусове повітряне; 3 – примусове повітряне; 4 – примусове повітряне і рідинне; 5 – примусове рідинне; 6 - примусове рідинне і природне випарне; 7 - примусове рідинне, примусове і природне випарне; 8 - природне і примусове випарне; 9 - примусове випарне.

### Розрахунок теплового режиму блоку в корпусі

Визначальними параметрами для розрахунку є питомі потужності розсіювання блоку пристрою в цілому  $p_k$  і нагрітої зони  $p_z$  відповідно:

$$p_k = P_0/S_k,$$

$$p_z = P_0/S_z,$$

де  $P_0$  – потужність, що розсіюється пристроєм;  $S_k$  - площа поверхні корпусу пристрою;  $S_z$  - умовна поверхня нагрітої зони.

У свою чергу площа поверхні корпусу пристрою та умовна поверхня нагрівальної зони визначаються за такою формулою:

$$S_k = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2)l_3],$$

$$S_z = 2[l_1 l_2 + (l_1 + l_2)l_3 k_3],$$

$$S_k = 2 * ((81.28 * 60.96 + (81.28 + 60.96) * 10.5)) = 17386 \text{ мм}^2 = 0.0174 \text{ м}^2$$

$$S_z = 0.014 \text{ м}^2$$

$$p_k = \frac{4.22}{0,0174} = 242,73 \text{ Вт/м}^2$$

$$p_z = \frac{4.22}{0,014} = 300,55 \text{ Вт/м}^2$$

Перегрів корпусу електронного пристрою, що працює в нормальних кліматичних умовах щодо навколишнього середовища, визначається за такою формулою:

$$\theta_1 = 0.1472 * p_k - 0.2962 * 10^{-3} * p_k^2 + 0.3127 * 10^{-6} * p_k^3$$

$$\theta_1 = 22,75 \text{ }^\circ\text{C}$$

Перегрів в зоні нагрівання визначається аналогічними залежностями:

$$\theta_2 = 0.1390 * p_z - 0.1223 * 10^{-3} * p_z^2 + 0.0698 * 10^{-6} * p_z^3$$

$$\theta_2 = 33,62 \text{ }^\circ\text{C}$$

За отриманими даними визначається перегрів повітря в блоці (пристрої)

$$\theta_{\text{пов}} = 0.5 * (\theta_1 + \theta_2) = 27,69 \text{ }^\circ\text{C}$$

Діапазон температур кожного елемента теплового навантаження залежить від питомої потужності елемента та питомої потужності зони нагріву.

**ATMega16**

Потужність елемента  $P_{ел} = 0.018$  Вт

Площа поверхні елемента  $S_{ел} = 0.000144$  м<sup>2</sup>

Питома розсіювальна потужність  $p_{ел} = \frac{P_{ел}}{S_{ел}} = 125 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Перегрівання поверхні компонента

$$\theta_{ел} = \theta_2 * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{ел}}{p_3}) = 27.86 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перегрівання навколишнього середовища

$$\theta_{ср} = \theta_{пов} * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{ел}}{p_3}) = 23.64 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні елемента

$$T_{ел} = \theta_{ел} + T_c = 29.45 + 45 = 67.8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура навколишнього середовища

$$T_{ср} = \theta_{ср} + T_c = 28.56 + 45 = 63.64 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оскільки температура поверхні компонента нижче максимальної робочої температури, компонент не буде перегріватися і може нормально працювати.

**LM7805**

Потужність елемента  $P_{ел} = 1.11$  Вт

Площа поверхні елемента  $S_{ел} = 0.0004186$  м<sup>2</sup>

Питома розсіювальна потужність  $p_{ел} = \frac{P_{ел}}{S_{ел}} = 770.83 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Перегрівання поверхні компонента

$$\theta_{ел} = \theta_2 * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{ел}}{p_3}) = 67.42 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перегрівання навколишнього середовища

$$\theta_{ср} = \theta_{пов} * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{ел}}{p_3}) = 57.22 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні елемента

$$T_{ел} = \theta_{ел} + T_c = 46.64 + 45 = 107.42 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура навколишнього середовища

$$T_{ср} = \theta_{ср} + T_c = 45.22 + 45 = 97.22 \text{ } ^\circ\text{C}.$$



Оскільки температура поверхні компонента нижче максимальної робочої температури, компонент не буде перегріватися і може нормально працювати.

### **L293D**

Потужність елемента  $P_{\text{ел}} = 0.222 \text{ Вт}$

Площа поверхні елемента  $S_{\text{ел}} = 0.0009 \text{ м}^2$

Питома розсіювальна потужність  $p_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{ел}}}{S_{\text{ел}}} = 237.88 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Перегрівання поверхні компонента

$$\theta_{\text{ел}} = \theta_2 * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 31.16 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Перегрівання навколишнього середовища

$$\theta_{\text{ср}} = \theta_{\text{пов}} * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 26.45 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні елемента

$$T_{\text{ел}} = \theta_{\text{ел}} + T_c = 71.16 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура навколишнього середовища

$$T_{\text{ср}} = \theta_{\text{ср}} + T_c = 66.45 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Оскільки температура поверхні компонента нижче максимальної робочої температури, компонент не буде перегріватися і може нормально працювати.

### **1N4148**

Потужність елемента  $P_{\text{ел}} = 0.2 \text{ Вт}$

Площа поверхні елемента  $S_{\text{ел}} = 0.00008 \text{ м}^2$

Питома розсіювальна потужність  $p_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{ел}}}{S_{\text{ел}}} = 2500 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Перегрівання поверхні компонента

$$\theta_{\text{ел}} = \theta_2 * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 92.31 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Перегрівання навколишнього середовища

$$\theta_{\text{ср}} = \theta_{\text{пов}} * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 78.34 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні елемента

$$T_{\text{ел}} = \theta_{\text{ел}} + T_c = 132.31 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура навколишнього середовища

$$T_{\text{ср}} = \theta_{\text{ср}} + T_c = 118.34 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оскільки температура поверхні компонента нижче максимальної робочої температури, компонент не буде перегріватися і може нормально працювати. Хоча у данному випадку можна замислитись над охолодженням.

### **VZX55C3V6**

Потужність елемента  $P_{\text{ел}} = 0.5 \text{ Вт}$

Площа поверхні елемента  $S_{\text{ел}} = 0.000358 \text{ м}^2$

Питома розсіювальна потужність  $p_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{ел}}}{S_{\text{ел}}} = 1396.648 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Перегрівання поверхні компонента

$$\theta_{\text{ел}} = \theta_2 * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 62.37 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перегрівання навколишнього середовища

$$\theta_{\text{ср}} = \theta_{\text{пов}} * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 52.93 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні елемента

$$T_{\text{ел}} = \theta_{\text{ел}} + T_c = 102.37 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура навколишнього середовища

$$T_{\text{ср}} = \theta_{\text{ср}} + T_c = 92.93 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оскільки температура поверхні компонента нижче максимальної робочої температури, компонент не буде перегріватися і може нормально працювати.

### **Резистор R1**

Потужність елемента  $P_{\text{ел}} = 0.0025 \text{ Вт}$

Площа поверхні елемента  $S_{\text{ел}} = 0.0001 \text{ м}^2$

Питома розсіювальна потужність  $p_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{ел}}}{S_{\text{ел}}} = 20 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Перегрівання поверхні компонента

$$\theta_{\text{ел}} = \theta_2 * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 24.54 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перегрівання навколишнього середовища

$$\theta_{\text{ср}} = \theta_{\text{пов}} * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 52.93 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні елемента

$$T_{\text{ел}} = \theta_{\text{ел}} + T_{\text{с}} = 64.54 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура навколишнього середовища

$$T_{\text{ср}} = \theta_{\text{ср}} + T_{\text{с}} = 92.93 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оскільки температура поверхні компонента нижче максимальної робочої температури, компонент не буде перегріватися і може нормально працювати.

### **Резистори R2, R3**

Потужність елемента  $P_{\text{ел}} = 1 \text{ Вт}$

Площа поверхні елемента  $S_{\text{ел}} = 0.0004 \text{ м}^2$

Питома розсіювальна потужність  $p_{\text{ел}} = \frac{P_{\text{ел}}}{S_{\text{ел}}} = 2579.98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ .

Перегрівання поверхні компонента

$$\theta_{\text{ел}} = \theta_2 * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 92.31 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перегрівання навколишнього середовища

$$\theta_{\text{ср}} = \theta_{\text{пов}} * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{\text{ел}}}{p_3}) = 78.34 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні елемента

$$T_{\text{ел}} = \theta_{\text{ел}} + T_{\text{с}} = 132.31 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура навколишнього середовища

$$T_{\text{ср}} = \theta_{\text{ср}} + T_{\text{с}} = 118.34 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оскільки температура поверхні компонента нижче максимальної робочої температури, компонент не буде перегріватися і може нормально працювати.

### **Резистор R4**

Потужність елемента  $P_{\text{ел}} = 1 \text{ Вт}$

Площа поверхні елемента  $S_{\text{ел}} = 0.0003 \text{ м}^2$

Питома розсіювальна потужність  $p_{ел} = \frac{P_{ел}}{S_{ел}} = 3703.7 \frac{Вт}{м^2}$ .

Перегрівання поверхні компонента

$$\theta_{ел} = \theta_2 * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{ел}}{p_3}) = 114.92 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Перегрівання навколишнього середовища

$$\theta_{ср} = \theta_{пов} * (0.75 + 0.25 * \frac{p_{ел}}{p_3}) = 97.53 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура поверхні елемента

$$T_{ел} = \theta_{ел} + T_c = 154.92 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура навколишнього середовища

$$T_{ср} = \theta_{ср} + T_c = 137.53 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Оскільки температура поверхні компонента нижче максимальної робочої температури, компонент не буде перегріватися і може нормально працювати.

### 2.1.8 Розрахунок надійності пристрою

Надійність обладнання визначається шляхом обчислення методу раптової несправності роботи відповідно до відомого показника надійності компонента обладнання, і враховуються такі припущення: збій компонента є статистично незалежним, а вихід з ладу будь-якого компонента спричинить збій всього обладнання.

Коефіцієнт відмов обладнання визначається формулою:

$$\lambda_c = k_\lambda \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot \lambda_{0i},$$

де  $\lambda_{0i}$  – частота відмов цього елемента.

$k_\lambda = k_{\lambda 1} * k_{\lambda 2} * k_{\lambda 3}$  – поправочний коефіцієнт для умов роботи обладнання:  $k_{\lambda 1}$ - вплив механічних факторів;  $k_{\lambda 2}$  - вплив кліматичних факторів;  $k_{\lambda 3}$  - умови роботи при низькому тиску.

$a_i$  – корекційний коефіцієнт, враховуючи вплив температури навколишнього середовища та коефіцієнта навантаження на електричне навантаження пристрою  $k_n$ ;

$k_n$  – коефіцієнт навантаження, тобто відношення завантаженості, встановленого за певними параметрами.

Середній час відмови всього обладнання визначатиметься за формулою:

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c}$$

#### Резистори постійні металоплівкові

Інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 0.4 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Коефіцієнт навантаження  $k_n = 0.5$

Поправочний коефіцієнт  $a = 1.07$

Кількість елементів – 4.

#### Конденсатори оксидні

Інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 0.8 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Коефіцієнт навантаження  $k_n = 0.7$

Поправочний коефіцієнт  $a = 7$

Кількість елементів – 4

### **Конденсатори керамічні**

Інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 0.7 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Коефіцієнт навантаження  $k_n = 0.7$

Поправочний коефіцієнт  $a = 2,8$

Кількість елементів – 10.

### **Діоди імпульсні**

Інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 1 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Коефіцієнт навантаження  $k_n = 0,5$ .

Поправочний коефіцієнт  $\alpha = 1,05$ .

Кількість елементів – 4.

### **Мікросхеми інтегральні**

Інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 1.5 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$

Кількість елементів – 3.

### **Елементи кріпильні.**

Інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 0.4 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$ .

Кількість елементів – 4.

### **Плата друкована**

Інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 0.1 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$ .

Кількість елементів – 1.

### Пайка сполучна

Інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 0.04 * 10^{-6} \frac{1}{\text{год}}$ .

Кількість елементів – 134.

Інтенсивність відмови пристрою дорівнює:

$$\lambda_c = 1.46 * 1 * 1 * 10^{-6} * (0.4 * 1.07 * 4 + 0.4 * 4 + 0.8 * 7 * 4 + 0.7 * 2.8 * 10 + 1.5 * 3 + 1.05 * 4 + 0.1 + 0.04 * 134) = 9,33995 * 10^{-5} \frac{1}{\text{год}}$$

$$T_c = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{9,33995 * 10^{-5}} = 10706,7 \text{ ч} \approx 1.07 \text{ роки.}$$

### 2.1.9 Вихідні дані створення апаратного забезпечення

У ході розробки апаратного забезпечення зроблено проектний розрахунок параметрів і розробка конструкції друкованого вузла мікропроцесорної системи. Проведена розробка друкованої плати і друкованого вузла, проведений тепловий розрахунок і розрахунок надійності друкованого вузла блоку.

Основні конструктивні параметри:

- розміри друкованого вузла  $99.06 \times 69.85 \times 10.5$  мм
- середнє напрацювання на відмову 10706,7 годин.

## 2.2 Розробка програмного забезпечення.

### 2.2.1 Підготовка до роботи.

Для роботи з протоколом I2C, модулем GY-521, необхідно установити та підключити необхідні бібліотеки, які знаходяться в інтернеті, у вільному доступі. Та налаштувати контроль MPU6050 та драйверу двигуна.

```
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050_6Axis_MotionApps20.h"
#include "MPU6050.h"

#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_WIRE
    #include "Wire.h"
#endif

MPU6050 mpu;
#define OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
// Змінні управління/статусу MPU
bool dmpReady = false;
uint8_t mpuIntStatus;
uint8_t devStatus;
uint16_t packetSize;
uint16_t fifoCount;
uint8_t fifoBuffer[64];

// Змінні орієнтації/руху
Quaternion q;    // [w, x, y, z]
VectorInt16 aa;   // [x, y, z]
VectorInt16 aaReal; // [x, y, z]
VectorInt16 aaWorld; // [x, y, z]
VectorFloat gravity; // [x, y, z]
```



```
float euler[3];    // [psi, theta, phi]
float ypr[3];     // [yaw, pitch, roll]

uint8_t teapotPacket[14] = { '$', 0x02, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0, 0x00, 0x00, '\r', '\n' };

// Пін для управління моментом нахилу (pitch motor)
const int pitchMotor1 =9;
const int pitchMotor2 =10;
const int pitchMotor3 =11;

// Пін для контролю крену двигуна (roll motor)
const int rollMotor1 =3;
const int rollMotor2 =5;
const int rollMotor3 =6;

// Змінна, щоб ми могли рухати двигун у потрібному напрямку
int increment = 0;

// Контроль швидкості оновлення двигуна
const int motorDelay = 7; // together with pot controls the RPM
long lastMotorDelayTime = 0;

// Змінна для ініціалізації орієнтації осей
const int pitchOrient = 25;
const int rollOrient = -20;

const boolean pitch = true;
const boolean roll = false;
```

```

const int pwmSin[] = {127, 135, 144, 152, 160, 168, 176, 183, 190, 198, 204, 211,
217,
    222, 228, 233, 237, 241, 244, 247, 250, 252, 253, 254, 254, 254,
    253, 252, 250, 247, 244, 241, 237, 233, 228, 222, 217, 211, 204,
    198, 190, 183, 176, 168, 160, 152, 144, 135, 127, 119, 110, 102,
    94, 86, 78, 71, 64, 56, 50, 43, 37, 32, 26, 21, 17, 13, 10, 7,
    4, 2, 1, 0, 0, 0, 1, 2, 4, 7, 10, 13, 17, 21, 26, 32, 37, 43,
    50, 56, 64, 71, 78, 86, 94, 102, 110, 119
};
// масив значень працездатності ШІМ для 8-бітної функції таймера;

```

```

//Змінні pitch motor
int pitchStepA = 0;
int pitchStepB = 32;
int pitchStepC = 64;

```

```

// Змінні roll motor
int rollStepA = 0;
int rollStepB = 32;
int rollStepC = 64;

```

### 2.2.2 Створення змінної для контролю за перериваннями

Створювана змінна буде вказувати чи піднявся штифт переривання MPU.

```

volatile bool mpuInterrupt = false; // indicates whether MPU interrupt pin has gone
high
void dmpDataReady() {
    mpuInterrupt = true;
}

```

### 2.2.3 Початкові налаштування

У цій частині програми проходить ініціалізація, перевірка, та очікування готовності усіх компонентів пристрою. А також введення даних для широко-імпульсної модуляції (ШИМ з англ. PWM - Pulse Width Modulation) для працездатності введення функції таймера. ШИМ – спосіб установки аналогового сигналу цифровим методом, тобто з цифрового виходу, який дає тільки нулі і одиниці для отримання плавно змінюваних значень.

```
void setup() {
  #if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_WIRE
    Wire.begin();
    TWBR = 24; // 400kHz I2C clock
  #elif I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_BUILTIN_FASTWIRE
    Fastwire::setup(400, true);
  #endif

  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);

  // ініціалізація пристрою
  Serial.println(F("Initializing I2C devices..."));
  mpu.initialize();

  // перевірка з'єднання
  Serial.println(F("Testing device connections..."));
  Serial.println(mpu.testConnection() ? F("MPU6050 connection successful") :
  F("MPU6050 connection failed"));

  // Очікування готовності
```

```

Serial.println(F("\nSend any character to begin DMP programming and demo:
"));
while (Serial.available() && Serial.read());
while (!Serial.available());
while (Serial.available() && Serial.read());

// завантаження та налаштування DMP
Serial.println(F("Initializing DMP..."));
devStatus = mpu.dmpInitialize();

// подати сюди свої власні компенсації гіроскопа, масштабуючи на
мінімальну чутливість
mpu.setXGyroOffset(220);
mpu.setYGyroOffset(76);
mpu.setZGyroOffset(-85);
mpu.setZAccelOffset(1788);

// перевірка працездатності (повертає 0, якщо так)
if (devStatus == 0) {
    // увімкніть DMP тепер, якщо перевірка повернула 0
    Serial.println(F("Enabling DMP..."));
    mpu.setDMPEnabled(true);

    // включити виявлення переривань
    Serial.println(F("Enabling interrupt detection (external interrupt 0)..."));
    attachInterrupt(0, dmpDataReady, RISING);
    mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

    // встановити прапор DMP Ready, щоб основна функція main loop ()
знала, що його можна використовувати

```

```

Serial.println(F("DMP ready! Waiting for first interrupt..."));
dmpReady = true;

packetSize = mpu.dmpGetFIFOPageSize();
} else {
    // ERROR!
    // 1 = початкове завантаження пам'яті не вдалося
    // 2 = DMP не вдалося оновити конфігурацію
    Serial.print(F("DMP Initialization failed (code ");
    Serial.print(devStatus);
    Serial.println(F(")"));
}

// Об'ява моторних пінів вихідними
pinMode(pitchMotor1, OUTPUT);
pinMode(pitchMotor2, OUTPUT);
pinMode(pitchMotor3, OUTPUT);
pinMode(rollMotor1, OUTPUT);
pinMode(rollMotor2, OUTPUT);
pinMode(rollMotor3, OUTPUT);
}

```

#### 2.2.4 Основна програма

```

void loop() {
    if (!dmpReady) return;
    while (!mpuInterrupt && fifoCount < packetSize) {
        // Переміщення крокового мотора
        if((millis() - lastMotorDelayTime) > motorDelay) {
            move(pitchStepA, pitchStepB, pitchStepC,
                pitchMotor1, pitchMotor2, pitchMotor3, pitch);

```

```

        move(rollStepA, rollStepB, rollStepC,
            rollMotor1, rollMotor2, rollMotor3, roll);
    }

    if( mpuInterrupt ) {
        break;
    }
}

// скинути прапор переривання і отримати байт INT_STATUS

mpuInterrupt = false;
mpuIntStatus = mpu.getIntStatus();

// отримати поточний підрахунок FIFO
fifoCount = mpu.getFIFOCount();

// перевірка на переповнення (цього ніколи не повинно відбуватися)
if ((mpuIntStatus & 0x10) || fifoCount == 1024) {

    // скидання, щоб ми могли продовжувати з чистого листа
    mpu.resetFIFO();
    Serial.println(F("FIFO overflow!"));

// otherwise, check for DMP data ready interrupt (this should happen frequently)
} else if (mpuIntStatus & 0x02) {
    while (fifoCount < packetSize) fifoCount = mpu.getFIFOCount();
    mpu.getFIFOBytes(fifoBuffer, packetSize);
    fifoCount -= packetSize;
}

```

```
#ifndef OUTPUT_READABLE_QUATERNION
// відображення значень quaternion у легкій матричній формі: w x y z
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
Serial.print("quat\t");
Serial.print(q.w);
Serial.print("\t");
Serial.print(q.x);
Serial.print("\t");
Serial.print(q.y);
Serial.print("\t");
Serial.println(q.z);
#endif
```

```
#ifndef OUTPUT_READABLE_EULER
// відображення кутів Ейлера в градусах
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetEuler(euler, &q);
Serial.print("euler\t");
Serial.print(euler[0] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.print(euler[1] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.println(euler[2] * 180/M_PI);
#endif
```

```
#ifndef OUTPUT_READABLE_YAWPITCHROLL
// відображення кутів Ейлера в градусах
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
```

```
Serial.print("ypr\t");
Serial.print(ypr[0] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.print(ypr[1] * 180/M_PI);
Serial.print("\t");
Serial.println(ypr[2] * 180/M_PI);
#endif

#ifdef OUTPUT_READABLE_REALACCEL
// відображати прискорення, відрегульоване для зняття сили тяжіння
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);
Serial.print("areal\t");
Serial.print(aaReal.x);
Serial.print("\t");
Serial.print(aaReal.y);
Serial.print("\t");
Serial.println(aaReal.z);
#endif

#ifdef OUTPUT_READABLE_WORLDACCEL
mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
mpu.dmpGetAccel(&aa, fifoBuffer);
mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
mpu.dmpGetLinearAccel(&aaReal, &aa, &gravity);
mpu.dmpGetLinearAccelInWorld(&aaWorld, &aaReal, &q);
Serial.print("aworld\t");
Serial.print(aaWorld.x);
```



```

    Serial.print("\t");
    Serial.print(aaWorld.y);
    Serial.print("\t");
    Serial.println(aaWorld.z);
#endif

#ifdef OUTPUT_TEAPOT
    teapotPacket[2] = fifoBuffer[0];
    teapotPacket[3] = fifoBuffer[1];
    teapotPacket[4] = fifoBuffer[4];
    teapotPacket[5] = fifoBuffer[5];
    teapotPacket[6] = fifoBuffer[8];
    teapotPacket[7] = fifoBuffer[9];
    teapotPacket[8] = fifoBuffer[12];
    teapotPacket[9] = fifoBuffer[13];
    Serial.write(teapotPacket, 14);
    teapotPacket[11]++;
#endif
}
}

```

### 2.2.5 Створення функції мотору

Ця функція керує рухом двигуна. Оновлення кожного з кроків вперед або назад залежно від орієнтації двигуна проти потрібного значення.

```

void move(int &currentStepA, int &currentStepB, int &currentStepC,
         int motorPin1, int motorPin2, int motorPin3, boolean axis) {

    // час затримки минув, здвиг на один крок
    if( axis == true ) {

```

```

if( (ypr[1] * 180/M_PI) <= pitchOrient ) {
    increment = -1;
} else {
    increment = 1;
}
} else if( axis == false) {
    if( (ypr[2] * 180/M_PI) <= rollOrient ) {
        increment = 1;
    } else {
        increment = -1;
    }
}
// Зберігає рухову орієнтацію в межах
currentStepA = currentStepA + increment;
if(currentStepA > 95) currentStepA = 0;
if(currentStepA < 0) currentStepA = 95;
currentStepB = currentStepB + increment;
if(currentStepB > 95) currentStepB = 0;
if(currentStepB < 0) currentStepB = 95;
currentStepC = currentStepC + increment;
if(currentStepC > 95) currentStepC = 0;
if(currentStepC < 0) currentStepC = 95;

// Оновлення орієнтації двигуна
analogWrite(motorPin1, pwmSin[currentStepA]);
analogWrite(motorPin2, pwmSin[currentStepB]);
analogWrite(motorPin3, pwmSin[currentStepC]);

lastMotorDelayTime = millis();
}

```

## ВИСНОВКИ

1. Розроблена комп'ютерна система контролю крокового двигуна на основі MEMS-маніпулятора.
2. Були розглянуті завдання, які повинна система контролю крокового двигуна. Була проведена класифікація двигунів та MEMS-датчиків за їх призначеннями та функціями. А також були розглянуті компоненти з яких була створена система.
3. Розроблено апаратне забезпечення: схема електрична принципова, підібрані комплектуючі, друкована плата, вибрані умови охолодження і розрахований тепловий режим, розрахунок надійності пристрою.
4. Розроблено програмне забезпечення мікроконтролера.
5. Було розглянуто MEMS-модулі та технологію розпізнання жестів. З'ясовано, що така система може бути реалізована та має місце бути на ринку товарів, завдяки своїй незвичайності та потенціалу до розвитку.
6. Отримана система має достатньо широке прикладне використання для побудови будь-яких людино-машинних інтерфейсів для управління механічними переміщеннями з використанням крокового двигуна. При цьому слід зазначити, що використання трьохканального маніпулятора з системою, з більш ніж одного крокового двигуна, дозволить керувати переміщенням будь-яких об'єктів у просторі за трьома координатами.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ГОСТ 10316-78. Гетінакс і склотекстолит фольговані. Технічні умови. - Введ. 01.01.79.
2. ГОСТ 15150-69. Машины, прилади та інші технічні вироби. Виконання для різних районів. Категорії, умови експлуатації, зберігання і транспортування в частині впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища. Введ. 01.01.70.
3. ГОСТ 2.417-91. ЕСКД. Плати друковані. Правила виконання креслень. -Введ. 01.07.92.
4. ГОСТ 2.701-84. Схеми. Види і типи. Загальні вимоги до виконання. - Введ. 01.07.85.
5. ГОСТ 2.755-87. Позначення умовні в графічних схемах. Пристрої комутаційні і контактні з'єднання. - Введ. 01.01.88.
6. ГОСТ 23751-86. Плати друковані. Основні параметри конструкції. - Введ. 01.07.87.
7. Довідник по напівпровідникових діодів, транзисторів і інтегральних схем. / Под.ред. М.М. Горюнова. - М.: «Енергія», 1977. - 744 с.
8. ДСТУ 2779-94. Монтаж електричний радіоелектронної апаратури та приладів. Загальні технічні вимоги до формування висновків і до установки виробів електронної техніки на друковані плати. - Введ. 01.01.96.
9. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Основи конструювання і технології електронних пристроїв» / Упоряд.: Ю. Е. Паеранд - Алчевськ: ДГМІ, 2003. 38 - с.
10. Практичний посібник з навчального конструювання РЕА. / Под ред. К. Б. Круковського-Сіневіча, Ю. Л. Мазора. - К.: «Вища школа», 1992. - 494с.
11. Резистори: Довідник. / Под ред. І.І. Четверткова і В.М. Терехова - М.: Радіо та зв'язок, 1991. - 528 с.
12. Шаговые двигатели. URL: <http://www.svaltera.ua/press-center/articles/4334.php>. Доступ: 22.10.2019.

13. MEMS Accelerometer Gyroscope Magnetometer & Arduino.  
URL: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/mems-accelerometer-gyrocope-magnetometer-arduino/>

14. Heydari H. Stepper motor control using the MC68HC11 / H. Heydari, O. Ansary, M. Urban, M. E. Shafeei // Computers in Education Journal. – 1996. – vol. 6. – iss. 2. – pp. 56–61.

15. Papajoannou Spiros G. Stepping motors – A review / Spiros G. Papajoannou // Computers & Electrical Engineering. – 1980. – vol. 7. – iss. 4. – pp. 243–266.

16. Stepper motor drivers. URL: <https://www.pololu.com/category/120/stepper-motor-drivers>.

17. Stepper motor drivers. URL: <https://www.st.com/en/motor-drivers/stepper-motor-drivers.html>.